

Санкт-Петербургский государственный университет

РЫКИН Иван

Выпускная квалификационная работа

**ВЫЯВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ОСНОВЕ
МАТЕРИАЛОВ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ**

Основная образовательная программа магистратуры

«Геоинформационное картографирование»

Профиль картография

Научный руководитель: к.т.н.,
ПАНИДИ Евгений Александрович

Рецензент: к.г.н.,
начальник ФГБУ «Северо-Западное УГМС»
ЦЕПЕЛЕВ Валерий Юрьевич

Санкт-Петербург

2018

Оглавление

Введение.....	3
ГЛАВА 1. Краткая характеристика территории исследований.....	7
1.1 Географическое положение.....	7
1.2 Климатическая характеристика.....	8
1.3 Исходная метеорологическая информация.....	9
1.4 Исходная спутниковая информация.....	10
ГЛАВА 2. Региональные особенности температурно-влажностного режима территории исследований	12
2.1 Определение дат перехода средней суточной температуры через пороговые значения.....	12
2.1.1 Метод определения дат перехода средней суточной температуры через 5° и 10°C согласно справочнику по климату.....	12
2.1.2 Определение дат перехода средней суточной температуры по методу Педя Д.А. и методу накопленных отклонений сумм от порогового значения.....	13
2.1.3 Метод определения граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень) по значениям норм средних суточных температур воздуха.....	14
2.2 Автоматизация метода по определению граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень).....	16
2.3 Анализ результатов, оценка климатических изменений.....	21
ГЛАВА 3. Использование данных дистанционного зондирования Земли с целью выявления климатических изменений.....	23
3.1 Определение граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень) по спутниковым данным.....	23
3.2 Автоматизация процесса обработки спутниковых данных для выявления климатических изменений по расчетным значениям NDWI.....	26
Заключение.....	29
Приложения.....	30
Приложение А.....	31
Приложение Б.....	37
Список литературы.....	43

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современное состояние климата подвержено изменениям термического и водного режимов, что обусловлено природными и антропогенными факторами. Одним из методов исследования изменения климата – является комплексный мониторинг изменения температуры и количества осадков внутри временных границ периода вегетации, то есть климатических сезонов (весна, лето, осень); наблюдение за изменениями дат наступления климатических сезонов, их продолжительностью и колебаниями температуры выше или ниже пороговых значений.

На сегодняшний день существует ряд проблем связанных с использованием уже существующих методик. Первая проблема связана с несовершенством терминологической базы, что приводит к спорам о том, что подразумевается автором методики под термином «устойчивый переход температуры через предельное (пороговое) значение». Вторая проблема – отсутствие современных методик, учитывающих особенности исследуемой территории, внутригодовых колебаний температуры, знание этих факторов позволило бы безошибочно определять даты устойчивого перехода температуры через пороговые значения.

Для проведения достоверного анализа изменений климата, требуется использовать методики, адаптированные под конкретную территорию с определенными климатическими условиями.

К большому сожалению, последние климатические справочники, в которых использовались адаптированные методики для определенных территорий, датируются 1965 и 1997 годами. Использовать данные, рассчитанные по старым методикам можно, лишь для сравнения с результатами, рассчитанными по идентичной методике, но за разные периоды времени. В практике исследований зачастую отдается предпочтение старым, сложным и не совсем достоверным методикам, не учитывающим современное состояние бедной и разряженной гидрометеорологической сети. Данное заключение подтверждается тем, что климатические справочники не переиздаются, не акцентируется внимание молодых ученых на внедрении новых расчетных методик, и тем, что неустанно сокращается количество гидрометеорологических станций.

В настоящей работе предлагается обоснование двух более надежных методик вычисления устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через пороговые значения по наземным данным, полученным с гидрометеорологических станций и по данным ежедневной спутниковой съемки.

В методике, основанной на наземных (метеорологических) данных, ведутся расчеты норм средних суточных температур полученных за многолетний период, что позволяет определять даты начала и конца климатических сезонов (весна, лето, осень) за весь период наблюдений. Зная пороговые значения дат климатических сезонов, можно анализировать изменения трендов температуры и осадков для любого года.

В методике, основанной на суточных данных спутниковой съемки, производится расчет норм средних суточных значений нормализованного разностного водного индекса (NDWI) за многолетний период наблюдений, что позволяет определять пороговые значения климатических сезонов (весна, лето, осень). Зная даты начала и конца климатических сезонов, можно анализировать изменения трендов NDWI.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в том, чтобы на основе анализа открытых данных, создать универсальный автоматизированный комплекс для выявления изменений климата на различных территориях, используя возможности открытого программного обеспечения (ПО). Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

1. Анализ зарубежного и отечественного опыта по определению дат устойчивого перехода температуры через пороговые значения;
2. Оценка современной обеспеченности исследуемой территории сетью метеорологических станций и длительными рядами наблюдений;
3. Изучение возможностей автоматизации процессов по определению дат начала и конца устойчивого перехода температуры через заданные пороговые значения, с использованием языка программирования Python;
4. Исследование динамики изменений температурного и влажностного режимов по наземным данным на территории Республики Коми.
5. Исследование динамики изменения значений NDWI.

Объект исследования. Объектом исследования являются современные изменения климата.

Предмет исследования. Тенденции изменения климатических характеристик в пределах исследуемой территории, в рамках климатических сезонов по данным наземных и спутниковых наблюдений, а также методики анализа и мониторинга изменений климата на территории Республики Коми (Россия).

Исходные данные. Материалы многолетних ежедневных наземных наблюдений гидрометеорологической службы за температурой и осадками, полученные из открытого источника (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml>) а также, ежедневные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутниковой системы Terra/Modis за

девятнадцатилетний период, с 2000 по 2018 год, полученные с открытых серверов Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США – NASA (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>).

Методы исследования. Применён комплексный, мультидисциплинарный, географический подход к анализу температурного и влажностного режимов климатических сезонов на исследуемой территории; автоматизированные методы установления и мониторинга климатических изменений.

Для автоматизированного определения дат переходов температуры через заданные пороговые значения использовались алгоритмы, написанные автором на языке программирования Python. Алгоритмы позволяют определять даты климатических сезонов для дальнейшего статистического анализа данных. Кроме того, использовались такие программные средства, как Microsoft (Excel, Word), а также открытое отечественное программное обеспечение (ПО) ГИС – NextGIS QGIS, свободно распространяемое компанией «NextGIS». Основными рабочими библиотеками, применяемыми в программировании, являются: numpy – математическая библиотека; gdal – библиотека для обработки растровых геопространственных форматов.

Научная новизна.

1. Разработан автоматизированный комплекс, позволяющий определять даты перехода температуры через пороговые значения, каждого климатического сезона (весна, лето, осень), благодаря рассчитанным значениям норм средних суточных температур за многолетний период наблюдений. Рассчитаны средние значения норм средних суточных значений температуры воздуха и суммы норм суточных значений осадков на каждый климатический сезон, для всех метеорологических станций.

2. Разработан автоматизированный комплекс по определению дат перехода температуры через граничные значения каждого климатического сезона (весна, лето, осень), по спутниковым данным за девятнадцатилетний период, с 2000 по 2018 год, благодаря рассчитанным нормам средних суточных значений NDWI. Рассчитаны средние значения норм средних суточных значений NDWI на каждый климатический сезон, для зон радиусом 10 километров от каждой метеорологической станции.

3. Впервые, на исследуемую территорию были получены по наземным данным нормы средних суточных значений температуры воздуха, средние значения норм средних суточных значений температуры за вегетационный период (весна, лето, осень). Согласно результатам, наблюдается явное увеличение средних значений средних суточных температур по всем климатическим сезонам за последние 18 лет.

4. Впервые, были рассчитаны нормы средних суточных значений NDWI, средние значения норм средних суточных значений NDWI за период вегетации (весна, лето, осень).

Достоверность и обоснованность результатов. Согласно результатам, полученным по данным действующих наземных станций, наблюдается явное увеличение средних значений средних суточных температур по всем климатическим сезонам, за последние 18 лет, на территории республики Коми.

Апробация результатов работы. Результаты и выводы выпускной квалификационной работы представлялись на международной научной конференции «Современная гидрометеорология: актуальные проблемы и пути их решения», место проведения – Украина, г.Одесса на базе ОГЭКУ в период с 21 по 23 марта 2018 года; на Большом географическом фестивале, прошедшем в СПбГУ в период с 6 по 8 апреля 2018 года. Подготовлены и поданы на рецензирование 3 статьи на русском языке и 1 на английском.

Объем работы составляет – 47 страниц.

Количество графиков составляет – 31.

Количество таблиц составляет – 4.

Количество приложений составляет – 2.

Количество использованных литературных источников – 52.

ГЛАВА 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Географическое положение

На северо-востоке Европейской территории России расположена Республика Коми (Рисунок 1.1). Охватывая около 416,8 км² площади (<http://www.rkomi.ru/left/info/polozh>), территория простирается на 1550 км с запада на восток и на 2929 км с юга на север. Крайние северная и южная точки расположены соответственно на 68⁰ и 59⁰ с.ш., а восточная и западная – на 66⁰ и 45⁰ в.д.

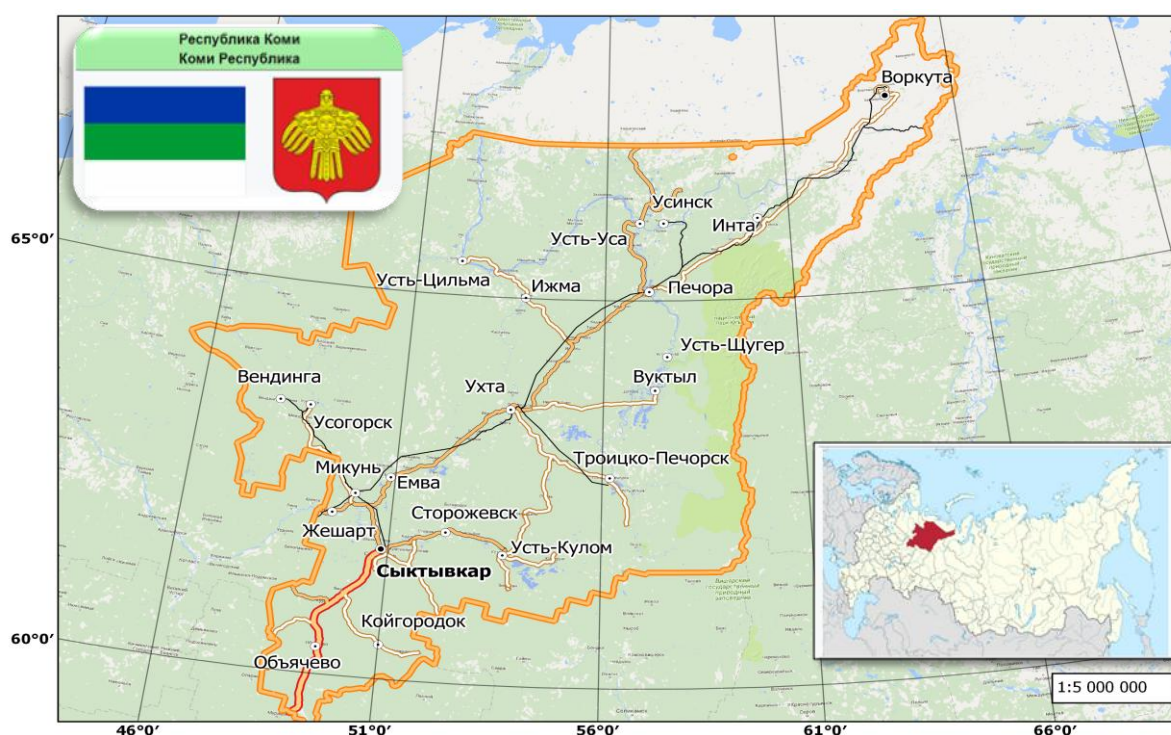


Рисунок 1.1 – Географическое расположение Республики Коми

Исследуемая территория представляет собой, в основном, лесную равнину, на которую с легкостью поступают влажные воздушные массы с западного и северо-западного направления, в связи с этим, территория характеризуется избыточным увлажнением. Природные условия, в основном, однообразны, изменяющиеся лишь вблизи полярного круга и у восточной границы республики, где равнина сменяется Уральскими возвышенностями.

Рельеф, в основном, равнинный, которому присуще наличие немногочисленных хребтов и невысоких плато, с западной стороны, характер рельефа, присущий горным странам. В целом, поверхность Республики Коми повышается с севера на юг, а это, в свою очередь, является одним из факторов определяющих сток рек.

Равнинная территория хорошо дренирована с развитой густой сетью речных долин и лишь местами заболочена. Уральские горы – барьер для влагосодержащих западных воздушных масс, они обеспечивают стабильное питание и большую водность рек.

Растительный покров, представлен хвойными лесами, а северней полярного круга – лесотундровым полесьем, мхами и лишайниками, кустарниковой растительностью. Леса еловые с примесью березы, сосны, осины. На обширных речных террасах, в основном сосновые леса. Возле границ полярного круга, расположены таежные зоны. Луговая растительность распространена на пойменных территориях.

Болота распространены по всей территории, чаще всего в северной части, где климат более влажный (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1972; Справочник по климату СССР, 1965; Атлас Республики Коми, 1997).

1.2 Климатическая характеристика

На формирование климата рассматриваемой территории влияют физико-географическое положение, наличие болот, густая речная сеть, повышенное увлажнение, благодаря этим и многим другим факторам, наблюдается неоднородность климата. Климатообразующими факторами также являются интенсивные западные переносы воздушных масс, малое количество поступающей солнечной радиации в зимний период года, а летом повышенное, близость морей, микро- и мезоформы рельефа, экспозиция склонов.

Важным орографическим барьером на пути переноса влагосодержащих воздушных масс, являются Тиманский хребет и Уральские горы, оказывающие огромное влияние на распределение стока воды и осадков на данной территории. Наиболее суровый климат наблюдается на северо-востоке республики, особенно в горных районах (Полярный Урал).

Атлантические циклоны играют важную роль в неустойчивости погоды. С ними связаны оттепели зимой, похолодания летом, увеличение облачности и продолжительности осадков.

Наиболее частое вторжение арктических воздушных масс наблюдается летом, сопровождающееся холодными и сухими ветрами, которые способствуют резкому похолоданию.

Благодаря частой смене воздушных масс, погода в регионе – неустойчивая.

Мощное воздействие на распределение температуры воздуха по региону, оказывают моря. На территориях, удалённых от морского побережья, зимой температура воздуха

понижается, а летом – наоборот повышается. Континентальность климата понижается с юга на север и с востока на запад.

Граница многолетней мерзлоты, на территории Коми, проходит от населённого пункта Ермица, пересекая долину реки Печоры, отклонившись на юго-восток, простирается до населённого пункта Макариха, что расположен на р. Уса, и далее, направляясь к восточной границе республики, вплоть до пересечения границы с Ямало-Ненецким АО.

Многолетняя мерзлота способствует поверхностному заболачиванию территории, а также влияет на растительный покров, препятствуя ведению сельского хозяйства (Ресурсы поверхностных, 1972; Справочник по климату, 1965; Атлас Республики Коми, 1997; <http://www.aisori-m.meteo.ru/waisori/index.html>).

1.3 Исходная метеорологическая информация

Для гидрометеорологического анализа, были использованы материалы открытой базы данных «Аисори» (<http://www.aisori-m.meteo.ru/waisori/index.shtml>), по средней суточной температуре воздуха и количеству осадков, за многолетний период наблюдений. Схема метеорологической изученности территории, по состоянию на 2018 год, представлена на рисунке 1.2.

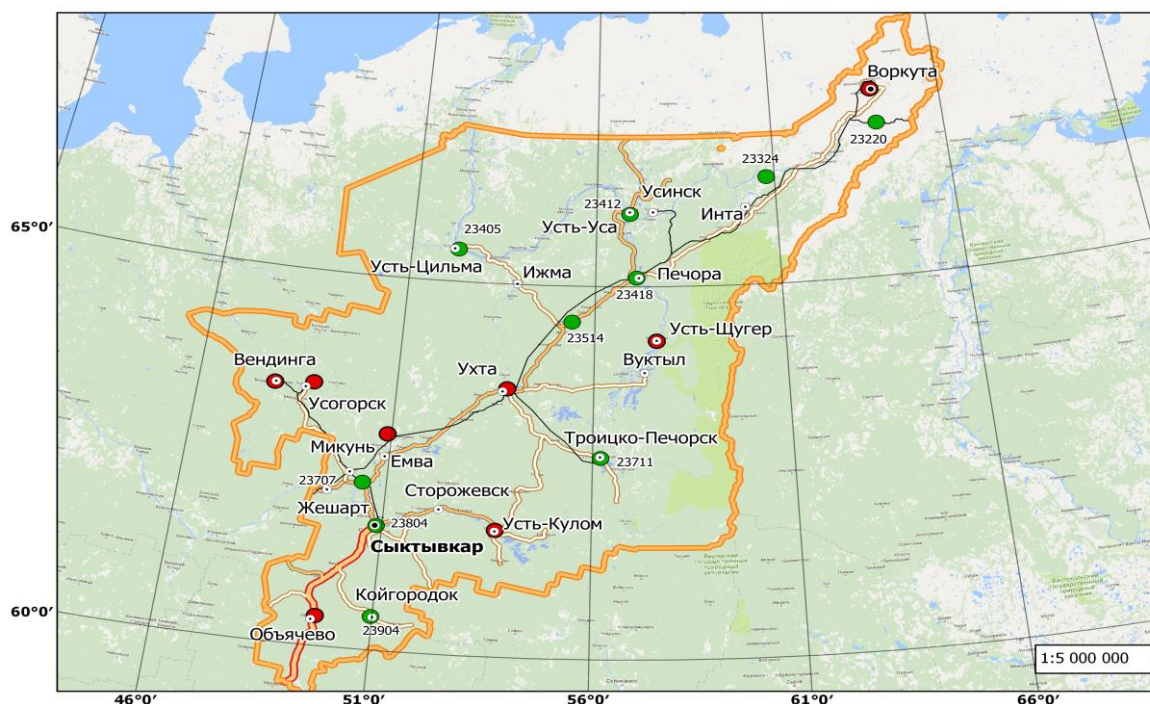


Рисунок 1.2 – Схема размещения гидрометеорологических станций (зеленым выделены посты с имеющимися данными, красным – данные отсутствуют)

Как видно из схемы размещения гидрометеорологических станций, сеть очень разреженная, из 17 станций, функционируют и передают данные только 10. Данная проблема наблюдается по всей территории России. При этом, что по состоянию на 1997 год, когда был издан Атлас Республики Коми по климату и гидрологии, на территории республики находилось и функционировало 100 метеорологических станций с длинными рядами наблюдений, благодаря этому, все расчеты в Справочнике по климату и в Атласе Республики Коми, являются более достоверными, на тот период времени (Справочник по климату, 1965; Атлас Республики Коми, 1997).

Перечень гидрометеорологических станций с указанием их идентификационного номера, согласно каталогу Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), используемые в работе, представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Состав и период наблюдений за метеорологическими показателями на гидрометеорологических станциях в пределах республики Коми

Название метеостанции и ее ID номер	Период наблюдений	
	Температура и осадки	Количество лет наблюдений
23220 Елецкая	1959 – 2017	58
23324 Петрунь	1904 – 2017	113
23405 Усть-Цильма	1892 – 2017	125
23412 Усть-Уса	1936 – 2017	81
23418 Печора	1943 – 2017	74
23514 Ираель	1959 – 2017	58
23707 Усть-Вымь	1959 – 2017	58
23711 Троицко-Печорское	1888 – 2017	129
23804 Сыктывкар	1888 – 2017	129
23904 Койгородок	1959 – 2017	58

1.4 Исходная спутниковая информация

Основная проблема при работе с гидрометеорологической информацией связана с отсутствием длинных, непрерывных рядов наблюдений, и с разреженностью сети гидрометеорологических станций.

Чтобы избежать неполноты данных и в целях повышения оперативности получения и обработки данных для больших территорий, используются данные с метеорологических или научно-исследовательских спутников.

Основные критерии при выборе спутниковых данных:

- среднее пространственное разрешение;
- высокое временное разрешение (высокая частота съемки одной и той же территории);
- открытость данных;
- наличие данных в требуемых спектральных диапазонах;
- широкий угол обзор территории;
- высокая скорость доступа к данным.

MODIS является важнейшим сенсором программы EOS (Earth Observing System), установленным на спутники TERRA и AQUA. Преимущество данного типа сенсоров обусловлено такими характеристиками: пространственное разрешение, временное разрешение и спектральное разрешение. Благодаря хорошему балансу между этими характеристиками и открытости данных, MODIS отлично подходит для мониторинга глобальных изменений, каждая точка поверхности Земли, ежедневно фиксируется в 36 дискретных спектральных диапазонах, что позволяет оперативно оценивать состояние объектов. TERRA непрерывно проводит ежедневную съемку Земли с 2000 года, и имеет самую большую базу снимков.

В работе использованы данные со спутника «Терра», полученные с использованием спектрорадиометра среднего разрешения «MODIS» за период с 2000 по 2018 год (19 лет).

Пространственное разрешение снимков приведено к 250 м на пиксель (MOD02). Уровень обработки получаемых данных – L1B, это означает, что они являются калиброванными данными (Calibrated), для выполнения геопривязки требуется файл с матрицей геолокации (MOD03). Данные поставляются в мультиобъектном формате HDF (Hierarchical Data Format). HDF является научным форматом, выбранным NASA (<https://www.ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>; MODIS Level 1B In-Granule Calibration Code, 2012; Modis Level 1B Product User's Guide, 2006; https://www.modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/dataproducts.php?MOD_NUMBER=02; Lingui, 2008; <http://www.gis-lab.info/qa/laadsweb.html>; <https://www.mcst.gsfc.nasa.gov/11b/11b-data-inputs-outputs>; Ahmad, 2002).

ГЛАВА 2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

С начала 20-го столетия, ученые постоянно говорят о глобальном изменении климата. Возник вопрос, какая тенденция изменения климата наблюдается на исследуемой территории. Согласно данным Атласа (Атлас Республики Коми, 1997), за период 1881 – 1990 гг., по сравнению с данными за период 1881 – 1935 гг., в северной части республики, норма годовой температуры воздуха повысилась на 0,3 – 0,5°C, в центральной части повышение было на 0,1 – 0,3°C, в южной – повышения не наблюдалось. За период с 1935 по 1990 гг., по сравнению с 1881 – 1935 гг., произошло повышение температуры в северном районе на 0,4 – 0,9°C, в центральном районе на 0,2 – 0,4°C, в южном на 0,1 – 0,2°C.

Повышение средней годовой температуры обусловлено потеплением холодного периода года, если брать по всей территории, а в летний период года, повышение произошло в северной части республики.

2.1 Определение дат перехода средней суточной температуры через пороговые значения

Для определения состояния климата, применяются временные значения, даты перехода средней суточной температуры воздуха выше или ниже пороговых значений температуры для определения продолжительности разных температурных периодов, которые учитываются в агрометеорологии, для анализа периода вегетации (начало весны – переход температуры выше 5°C; конец осени – переход температуры ниже 5°C), периода активной вегетации (переход температуры выше/ниже 10°C – начало /конец лета), периода созревания теплолюбивых культур – выше 15°C (Справочник по климату СССР, 1965).

2.1.1 Метод определения дат перехода средней суточной температуры через 5° и 10°C согласно справочнику по климату

В справочнике по климату (Справочник по климату СССР, 1965), переход среднесуточной температуры выше 5°C весной соответствует началу вегетационного периода большинства растений. Переход температуры выше 10°C является показателем

теплообеспеченности большинства сельскохозяйственных культур, выше 15°C – показатель возможности созревания теплолюбивых культур, а, следовательно, раскрывает целесообразность сельскохозяйственного воздействия на данную территорию. Переход температуры ниже 5°C (осенью) свидетельствует о прекращении периода вегетации, следовательно, является началом холодного (зимнего) периода.

Анализ метода. Исходя из формулировки метода определения дат устойчивого перехода средней суточной температуры выше или ниже указанного порогового значения, не указано правило определения «устойчивого перехода» при значительных флуктуациях в пределах одного сезона. Возникает вопрос в достоверности рассчитанных в справочнике дат, так как при определенных ситуациях, даты будут слишком ранними или слишком поздними по сравнению с фактическими.

2.1.2 Определение дат перехода средней суточной температуры по методу Педя Д.А. и методу накопленных отклонений сумм от порогового значения

Самым распространенным в климатологии является метод Педя, предложенный в 50-х годах прошлого столетия (Педь, 1951), в нем была исправлена неточность, уточнен случай возможного перехода средней суточной температуры через заданное пороговое значение (Козельцева, 1987). В методе используется средняя суточная температура.

В методе, датой устойчивого перехода температуры через некое заданное значение весной, летом или осенью, принимается тот день, после которого совсем не было обратного перехода, а если он был, то сумма его положительных отклонений превышала сумму отрицательных.

В конце 80-х годов был разработан метод (Sladek, 1989), согласно которому дата устойчивого перехода определялась исходя из расчета накопленных сумм отклонений от порогового значения. Этот метод более автоматизирован, по сравнению с методом Педя (Мирвис, 1996). Оба метода имеет смысл рассматривать как единое целое.

Анализ метода. Данные методы не позволяют достаточно точно определять даты устойчивого перехода, при наличии нескольких длительных переходов в разные стороны (колебания) от порогового значения температуры в течении одного сезона (Скриник, 2008), ситуация схожая с проблемой метода, описанного в разделе 2.1.1.

Исходя из резких колебаний среднесуточной температуры на метеостанциях, и такого же резкого изменения погоды, применение данного метода не целесообразно из-за невозможности гарантировать достоверность определения устойчивых дат перехода.

2.1.3 Метод определения граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень) по значениям норм средних суточных температур воздуха

В результате анализа методов, представленных в публикациях (Скриник, 2008; Скрыник, 2009), было решено получить сглаженную кривую средних суточных колебаний температуры в разрезе всего периода наблюдений (норму), используя автоматизированный комплекс.

В основу метода положены граничные значения температуры, указанные в климатическом справочнике по республике Коми (Справочник по климату СССР, 1965), но с оговоркой о том, что, если значение нормы средней суточной температуры выше 5°C , но меньше 10°C – климатическая весна; если значение нормы средней суточной температуры выше 10°C – климатическое лето; если значение нормы средней суточной температуры выше 5°C , но меньше 10°C , сразу же следующее за климатическим летом – климатическая осень.

Важная ремарка, началом и концом климатического сезона является первый переход нормы средней суточной температуры через граничное значение, последующие колебания являются кратковременными потеплениями или похолоданиями наступившего климатического сезона.

Определенные опытным путем даты климатических сезонов могут применяться для всех лет, предшествующих последнему году, используемого в расчетах периода, а также в последующих годах, так как последующие 1-3 года не смогут оказать существенного влияния на распределение величин норм средних суточных значений температуры, если речь идет о длинном ряде наблюдений.

Благодаря расчету норм средних суточных значений температуры воздуха для каждой метеостанции, можно получить граничные даты климатических сезонов (весна, лето, осень), которые учитывают все колебания температуры за многолетний период наблюдений и тем самым нивелирует аномалии.

Данный метод учитывает все температурные колебания за многолетний период, на выходе получаем сглаженную кривую хода норм средних суточных температур, по которой легко определяются даты перехода температуры через заданные температурные границы. Это позволяет выявлять внутригодовые изменения температуры на заданной территории, используя многолетние климатические температурные характеристики. Чем длиннее ряд наблюдений, тем более сглаженной будет норма средней суточной температуры воздуха.

Из года в год, нормы средней суточной температуры обновляются, а, следовательно, и граничные даты климатических сезонов. Благодаря этим обновлениям методика является динамической, автоматически улучшаемой благодаря длительности рядов наблюдения.

На примере метеостанции Сыктывкар, за 129-летний период, с 1888 по 2017 гг., было рассчитано распределение нормы средней суточной температуры воздуха, представлено в графическом виде на рисунке 2.1.

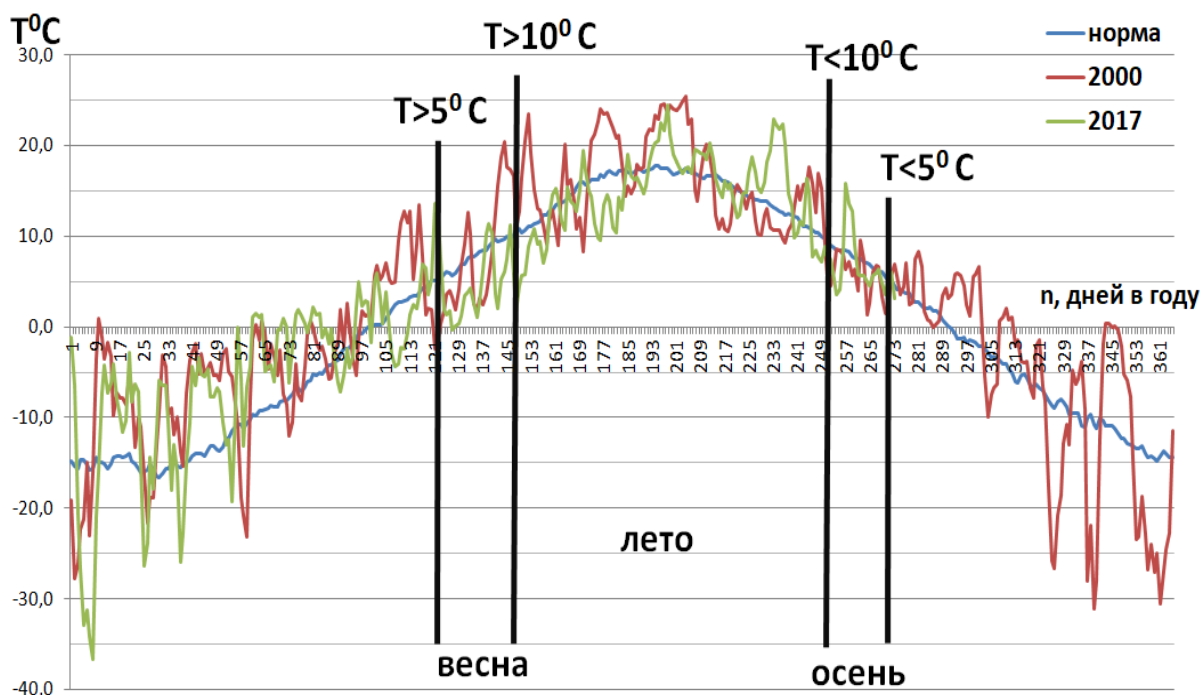


Рисунок 2.1 – График хода норм средних суточных температур воздуха на метеостанции Сыктывкар за период с 1888 по 2017 гг. – норма, а также, фактические средние суточные температуры за 2000 год – красная и 2017 год – зеленая линии

На графике, по данным нормы средней суточной температуры можно с легкостью определить даты начала и конца климатических сезонов (весна, лето, осень), то есть, переход нормы средней суточной температуры через пороговые значения (5°C и 10°C), а затем использовать эти даты для анализа изменений любого года.

Как видно из графика, по фактическим данным средней суточной температуры за 2000 и 2017 годы, очень трудно определить даты перехода температуры через пороговые значения в 5°C и 10°C.

Благодаря определению норм средних суточных температур воздуха, стало возможным получать даты, которые не будут часто и сильно меняться для расчетов в каждом последующем году, что в свою очередь ускоряет и облегчает выявление достоверных трендов изменения температуры и количества осадков на данной территории, а в дальнейшем, представляется возможность делать заключения по изменению климата.

Для оценки изменчивости значений температуры в климатических сезонах, данный метод является наиболее подходящим, так как в нем заложены температурные данные по

всем погодным условиям, имеющих место когда-либо быть на данной территории, за многолетний период наблюдений.

2.2 Автоматизация метода по определению граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень)

Практическая реализация автоматизированного метода включает решение двух важных задач:

- Расчет средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) по исходным значениям средней суточной температуры за многолетний период;
- Определение дат перехода температуры через пороговые значения, определение климатических сезонов (весна, лето, осень).

Процесс автоматизации, основан на программировании, используется язык Python (2.x, 3.x). Решение задачи базируется на принципах объектно-ориентированного программирования (ООП). Блок-схема процесса обработки и расчета норм средних суточных температур воздуха представлена на рисунке 2.2. Одним из основных преимуществ объектно-ориентированного подхода, является то, что используются программные классы, в частности – `Station` и `MeteoParam`, в них хранятся все метеостанции, объединенные общими параметрами (дата (`date`), идентификатор (`id`), температура (`tt`), осадки (`pp`)), которые называются экземплярами класса (полями).

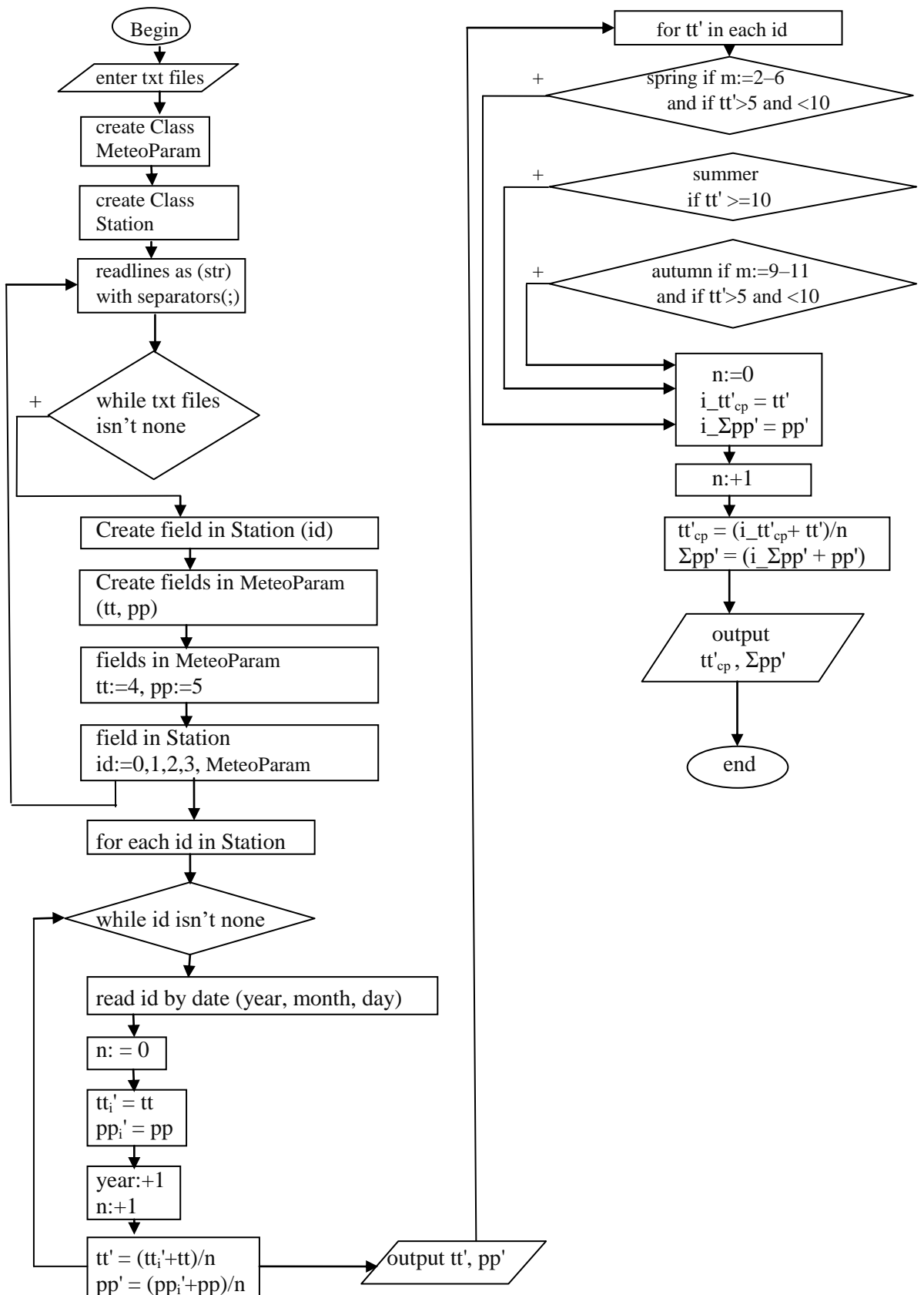


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритма программы по расчету норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'), норм суточных значений осадков (pp'), средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и суммы норм суточных значений осадков ($\Sigma pp'$), где tt – средние суточные значения температур, pp – количество осадков за сутки

Вне классов, расположен механизм чтения файлов с данными по каждой метеостанции, так называемый «парсинг», в классе `MeteoParam` расположены данные по температуре и осадкам, которые компонуются с датой, а затем используются классом `Station`.

Часть кода, отвечающая за создание и наполнения класса `Station` данными, представлена на рисунке 2.3.

```
class Station():
    # инициализировал атрибуты для класса Station
    def __init__(self, file_path):

        f = open(file_path, 'r')
        self.slovar = {} # Это поле класса

        for line in f.readlines():
            data_content = line.split(',')
            self.id = data_content[0] # Это поле класса
            current_year = data_content[1]
            current_month = data_content[2]
            current_day = data_content[3]
            date = (datetime.date
                    (
                        year=int(current_year),
                        month=int(current_month),
                        day=int(current_day)
                    )
                )

            tt = data_content[4]
            pp = data_content[5]

            self.slovar[date] = MeteoParam(tt, pp) # Это поле класса

        f.close()

class MeteoParam():
    def __init__(self, tt, pp):
        self.tt = tt # Это поле класса
        self.pp = pp # Это поле класса

    def __str__(self): # функция позволяющая вывести на экран строку
        return "" + str(self.tt) + ";" + str(self.pp)
```

Рисунок 2.3 – Структура классов, поля, методы

После структурирования данных по классам, можно быстро обращаться к ним и производить всевозможные операции, вызывая функции вне класса, производятся расчеты норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'), норм суточных значений осадков (pp'), средних значения норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и суммы норм суточных значений осадков ($\Sigma pp'$).

После расчета значений норм средних суточных температур воздуха по каждой станции, автоматизировано, при помощи языка программирования Python, производится определение дат перехода норм средних суточных температур через пороговые значения, указанные в предыдущей главе.

Определив даты перехода норм средних суточных температур через пороговые значения, производится расчет средних значений норм средних суточных температур воздуха (tt'_{cp}) и суммы норм суточных значений осадков ($\Sigma pp'$) за каждый период (весна, лето, осень) для всех метеостанций.

Результаты автоматизированного определения дат перехода норм средних суточных значений температуры через пороговые значения в $+5^{\circ}\text{C}$ и $+10^{\circ}\text{C}$, а также результаты расчетов средних значения норм средних суточных значений температуры воздуха ($tt'_{\text{ср}}$), и суммы норм суточных значений осадков ($\Sigma pp'$) представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты автоматизированного определения граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень) и их нормированные характеристики

ID станции		23220	23324	23405	23412	23418	23514	23707	23711	23804	23904
ВЕСНА	начало	7.06	1.06	21.05	29.05	21.05	20.05	3.05	11.05	30.04	30.04
	конец	18.06	15.06	11.06	14.06	9.06	9.06	26.05	2.06	26.05	19.05
	длительность	11	14	21	16	19	20	23	22	26	19
	$tt'_{\text{ср}}$	6,5	6,8	7,0	7,3	7,1	7,6	7,6	7,6	7,5	7,7
	$\Sigma pp'$	22,3	24,6	36,8	26,5	35,8	39,7	31,6	39,9	37,9	30,5
ЛЕТО	начало	19.06	16.06	12.06	15.06	10.06	10.06	27.05	3.06	27.05	20.05
	конец	17.08	24.08	29.08	25.08	27.08	26.08	6.09	2.09	5.09	8.09
	длительность	59	69	78	71	78	77	102	91	101	111
	$tt'_{\text{ср}}$	12,5	12,9	13,5	13,3	14,0	13,9	14,4	14,3	14,8	14,5
	$\Sigma pp'$	130,7	128,0	158,6	131,1	160,2	174,4	212,7	199,3	214,7	259,9
ОСЕНЬ	начало	18.08	25.08	30.08	26.08	28.08	27.08	7.09	3.09	6.09	9.09
	конец	14.09	18.09	22.09	16.09	23.09	20.09	29.09	24.09	29.09	30.09
	длительность	27	24	23	21	26	24	22	21	23	21
	$tt'_{\text{ср}}$	7,5	7,3	7,5	7,6	7,6	7,7	7,2	7,5	7,5	7,4
	$\Sigma pp'$	69,3	54,6	50,8	52,7	62,8	62,5	46,9	46,7	49,5	44,3

Анализируя результаты, представленные в таблице 2.1, возможно сделать вывод, что средние значения норм средних суточных значений температуры воздуха ($tt'_{\text{ср}}$) весной и летом повышаются с севера на юг, а осенью – остаются почти неизменными. Суммы норм суточных значений осадков ($\Sigma pp'$) за весенний и летний периоды возрастают с севера на юг, а осенью – понижаются.

Графическая интерпретация автоматизированного определения дат перехода, на примере станции Сыктывкар (23804), представлена на рисунке 2.4.

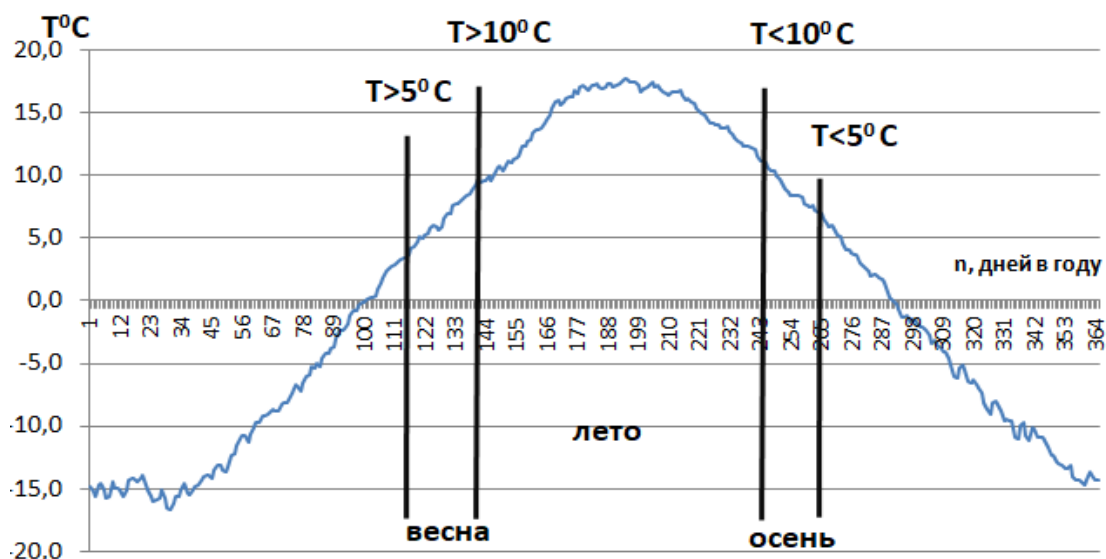


Рисунок 2.4 – Определения дат климатических сезонов (весна, лето, осень) для станции Сыктывкар (23804) по нормам средних суточных значений температуры воздуха (tt')

На рисунке 2.4, заметна некая сглаженность кривой хода норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'), благодаря этой сглаженности, в многолетнем разрезе, нивелируются резкие (аномальные) скачки температуры, которые не позволяют определить истинное значение дат климатических сезонов (весна, лето, осень).

Для анализа изменения климата в 21 веке, выбраны средние суточные значения температуры по каждой станции за период наблюдений с 2000 по 2017 год.

После расчета дат наступления климатических сезонов (весна, лето, осень), представленных в таблице 2.1, определяются характеристики сезонов для каждого года, тем самым, удастся отслеживать тенденции к изменению климата.

Результаты расчетов на каждый климатический сезон средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха ($tt'_{\text{ср}}$) за многолетний период наблюдений и результаты расчетов средних значений средних суточных температур ($tt_{\text{ср}}$) за 18 лет 21-го века, представлены в графическом виде в приложении А.

Результаты расчетов на каждый климатический сезон сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma pp'$) за многолетний период наблюдений и результаты сумм суточных значений осадков (Σpp) за 18 лет 21-го века, представлены в приложении Б.

2.3 Анализ результатов, оценка климатических изменений

По результатам анализа средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) воздуха по климатическим сезонам за 18 лет 21-го века, подтверждается факт повышения температуры воздуха, описанный авторами (Справочник по климату СССР, 1965; Атлас Республики Коми, 1997), наблюдается усиление контрастности изменения температуры за расчетный период (18 лет).

При анализе графиков (приложение А), видно, что температура весеннего периода за последние годы значительно выросла, например, для станции Усть-Уса (23412), со значения 7°C в 2000 году, до $10,2^{\circ}\text{C}$ в 2017, превышение температуры составило $+3,2^{\circ}\text{C}$, а относительно нормы, значение возросло на $2,9^{\circ}\text{C}$. Для станций (Елецкая (23220), Петрунь (23224), Усть-Цильма (23405), Усть-Уса (23412), Печора (23418), Ираель (23514)), в осенний сезон, наблюдается снижение температуры в пределах от $0,2^{\circ}\text{C}$ до $0,6^{\circ}\text{C}$. Замечу, что изменение температуры в осенний сезон, на других станциях (более южных), составляет от $+0,2^{\circ}\text{C}$ до $+2,2^{\circ}\text{C}$.

Вероятно, снижение температуры в северных и центральных районах территории замедляется, приближается к значениям нормы, а далее температура будет повышаться, так как разница между повышением температуры (южные районы) и понижением (северные районы), в целом, по региону колоссальная.

Результаты изменения тренда средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) по сезонам, представлены в таблице 2.2, а графически – в приложении А.

Таблица 2.2 – Результаты изменения средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) по сезонам (весна, лето, осень), за 18 лет 21-го века, средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp})

ID станции		23220	23324	23405	23412	23418	23514	23707	23711	23804	23904
ВЕСНА	tt'_{cp}	6,5	6,8	7,0	7,3	7,1	7,6	7,6	7,6	7,5	7,7
	значение тренда	9,0	9,8	9,5	10,2	9,8	9,8	9,5	10,1	9,8	9,0
	разница	+ 2,5	+ 3,0	+ 2,5	+ 2,9	+2,7	+ 2,2	+ 1,9	+ 2,5	+ 2,3	+ 1,3
ЛЕТО	tt'_{cp}	12,5	12,9	13,5	13,3	14,0	13,9	14,4	14,3	14,8	14,5
	значение тренда	13,5	14,0	14,1	14,1	14,8	14,3	15,2	15,0	15,7	15,5
	разница	+ 1,0	+ 1,1	+ 0,6	+ 0,8	+ 0,8	+ 0,4	+ 0,8	+ 0,7	+ 0,9	+ 1,0
ОСЕНЬ	tt'_{cp}	7,5	7,3	7,5	7,6	7,6	7,7	7,2	7,5	7,5	7,4
	значение тренда	7,6	7,8	8,0	8,0	8,0	7,8	9,0	8,2	9,3	9,0
	разница	+ 0,1	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,4	+ 0,4	+ 0,1	+1,8	+ 0,7	+ 1,8	+ 1,6

При анализе таблицы 2.2, видно, что относительно средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}), по всем метеостанциям наблюдается повышение температуры. Особенно это повышение ярко выражено в весенний период. Значения, превышающие средние значения норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}), показывают, что период с 2000 по 2018 год является теплым для всех метеостанций на исследуемой территории. Помимо температуры, важным индикатором изменения климата является количество осадков, при анализе графических результатов, представленных в приложении Б, видно, что изменение количества осадков не связано с изменением температуры.

Результаты изменения сумм суточных значений осадков (Σ_{pp}) за 18 лет 21-го века, по климатическим сезонам, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты изменения тренда сумм суточных значений осадков (Σ_{pp}) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) за 18 лет 21-го века

ID станции		23220	23324	23405	23412	23418	23514	23707	23711	23804	23904
ВЕСНА	2000	30	22	36	27	40	48	33	60	60	55
	2017	19	24	37	29	49	49	32	30	30	30
	изменение	- 11	+ 2	+ 1	+ 2	+ 9	+ 1	- 1	- 30	- 30	- 25
ЛЕТО	2000	150	180	175	149	200	180	205	190	210	285
	2017	100	110	180	148	150	181	235	249	260	265
	изменение	- 50	- 70	+ 5	- 1	- 50	+ 1	+ 30	+ 59	+ 50	- 20
ОСЕНЬ	2000	63	50	70	53	63	55	30	46	35	30
	2017	67	54	48	30	55	65	75	65	80	80
	изменение	+ 4	+ 4	- 22	- 17	- 8	+ 10	+ 45	+ 19	+ 45	+ 50

Относительно изменения количества суммы осадков весной, за последние 18 лет, наблюдается уменьшение на южных станциях Койгородок (23904), Сыктывкар (23804), Троицко-Печорская (23711), Усть-Вымь (23707) в пределах от 1 до 30 мм, и на северной станции Елецкая (23220) на 11 мм. На других станциях наблюдается увеличение суммы осадков в пределах от 1 до 9 мм.

Летом, наблюдается повышение количества осадков в южных, центральных и западных регионах Коми, на 10 – 59 мм, кроме станции Койгородок (23904), на которой отмечается понижение на 20 мм. На северных станциях отмечается понижение количества осадков, в пределах от 1 до 70 мм.

Осенью, количество осадков повышается на южных и на северных станциях в пределах от 4 до 50 мм, на других станциях – понижается в пределах 8 – 22 мм.

ГЛАВА 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ЦЕЛЮ ВЫЯВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Данные космических съемок, на сегодняшний день, доступны широкому кругу пользователей, активно распространяемые безвозмездно, или на коммерческих условиях. Это позволяет применять их в научно-исследовательских, производственных задачах, то есть, возможно их использование широким кругом специалистов.

Успех в понимании климатических систем и исследовании их изменений, обеспечивается дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ) путем количественной оценки процессов в пространственно-временном разрезе. Благодаря использованию данных ДЗЗ, могут быть обнаружены важные особенности изучаемых элементов (Jun, 2013; Bontemps, 2011; Gong, 2013).

Спутниковые данные часто используются для моделирования динамики изменений климатической системы и улучшения прогнозных методик (Ghent, 2011). Данные ДЗЗ широко используются для разработки мер по предотвращению или смягчению последствий от изменений климата (Joyce, 2009).

Таким образом, в настоящее время есть реальные возможности для разработки последовательной, научно-обоснованной методики и концепции дистанционного мониторинга изменений климата.

С момента запуска первой спутниковой системы, позволяющей получать цифровые данные, накопился большой архив данных ДЗЗ, который регулярно обновляется. Данные ДЗЗ – источник актуальной, оперативной информации, которая является основой для научно-исследовательских работах, и имеет особое значение, при недостаточности или отсутствии наземных данных.

3.1 Определение граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень) по спутниковым данным

Опираясь на опыт отечественных и зарубежных ученых (Stow, 2004; Jia, 2006; Jia, 2009; Goetz, 2007; Krankina, 2010; Walker, 2006; Wookey, 2006; Panidi, 2016; Panidi, 2017; Bobkov, 2015; Паниди, принята к публикации; Рыкин, принята к публикации; Рыкин, Паниди, принята к публикации; Барталаев, 2016; Гордов, 2013; Panidi, Rykin, preparing for

publication), в работе, в качестве индикатора изменения климата используется состояние наземной экосистемы, а именно – растительный покров, состояние которого исследуется в автоматизированном режиме. Данный метод основан на устойчивой взаимосвязи между динамикой температуры воздуха и параметрами растительного покрова.

Метод основан на определении граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень) по материалам спутниковой съемки растительного покрова, в частности на основе анализа годового хода нормализованного разностного водного индекса (Normalized Difference Water Index – NDWI), осредненного за многолетний период наблюдений (19 лет). В данной работе, период наблюдений с 01.01.2000 года по настоящее время (20.05.2018). Индекс рассчитывается на основе материалов ежедневной спутниковой съемки MODIS.

Используемые продукты MODIS 1-го уровня обработки 1B (Ahmad;
<https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD02QKM.html>;
<https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD02HKM.html>;
<https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD03.html>;
https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD35_L2.html):

MOD02HKM – содержит в себе исправленные значения, излучения, отражения на косинус угла зенита солнца, каналы 3 и 7 с пространственным разрешением 500 м;

MOD02QKM – содержит в себе исправленные значения, излучения, отражения на косинус угла зенита солнца, каналы 1 и 2 с пространственным разрешением 250 м;

MOD03 – содержит данные о геолокации для каждого пикселя, разрешение соответствует 1 км;

MOD35_L2 – продукт маски облачности, пространственное разрешение 1 км.

Спутниковые данные получены из открытого источника, и являются свободно распространяемыми материалами для решения научно-исследовательских задач (<https://www.ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>).

NDWI рассчитывается на основе спектральной яркости поверхности в ближней инфракрасной (NIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) областях электромагнитного спектра. В данном методе NDWI рассчитывался на основе коэффициентов спектральной яркости для длин волн 0,86 μm и 1,24 μm . Индекс чувствителен к сезонным изменениям количества воды в тканях растений.

В зарубежных источниках, встречаются различные расчетные формулы NDWI (Hanqiu, 2006; Sekhon, 2010), однако в моем методе, используется классическая формула NDWI (Gao, 1996):

$$NDWI = \frac{\rho_{0,86} - \rho_{1,24}}{\rho_{0,86} + \rho_{1,24}}; \quad (2.1)$$

где, $\rho_{0,86}$ – коэффициент спектральной яркости для ближней инфракрасной области спектра (NIR);

$\rho_{1,24}$ – коэффициент спектральной яркости для коротковолновой инфракрасной области спектра (SWIR).

Расчеты индекса производились для зоны радиусом 10 километров от каждой из метеорологических станций, согласно «рекомендациям по оценке характерности метеорологического наблюдательного подразделения и защищенности метеорологической площадки» и исходя из личного опыта (Руководящий документ).

Этапы определения граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень):

- 1) Расчет значений NDWI.
- 2) Расчет средних суточных значений NDWI для каждого года.
- 3) Расчет норм средних суточных значений индекса за многолетний период, осредненные 10 километровыми зонами, вокруг метеорологических станций.
- 4) Поиск двух абсолютных минимальных значений индекса NDWI, являющихся началом (начало климатической весны) и концом (конец климатической осени) вегетационного периода.
- 5) Построение тренда между двумя минимальными нормами средних суточных значений индекса, место первого пересечения линии тренда с графиком норм средних суточных значений NDWI соответствует концу климатической весны (начало климатического лета), а место второго пересечения – концу климатического лета (начало климатической осени).

Данный метод учитывает все колебания индекса NDWI за многолетний период, и на выходе получается сглаженная кривая хода норм средних суточных значений индекса NDWI, по которой легко определяются граничные даты климатических сезонов для каждой зоны.

После определения граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень), рассчитываются для каждого года, по данным средних суточных значений NDWI средние значения средних суточных значений NDWI за климатические сезоны на каждый год. Полученные средние значения, средние значения средних суточных значений NDWI, сравниваются с данными за каждый год и со средним значением норм средних суточных значений NDWI. Далее, результаты заносятся в таблицу, по которой рассчитываются отклонения средних значений среднего значения NDWI по климатическим сезонам,

различных лет, с данными среднего значения норм средних суточных значений NDWI, производится анализ и выносится заключение об изменении климата в различные годы относительно средних многолетних значений NDWI (нормы).

3.2 Автоматизация процесса обработки спутниковых данных для выявления климатических изменений по расчетным значениям NDWI

Этапы подготовки спутниковых данных к обработке и их анализу:

- налажена автоматическая загрузка массивов данных MODIS с серверов NASA (<https://www.ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>). Предварительный объем, который необходим для выполнения расчетов, составляет 30 ТБ.

Пример написанного кода для выкачивания данных представлен на рисунке 3.1.

```

14 import socket
15 import requests
16 import os
17
18 WEB_API_FILES = 'https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/api/v1/files/product={0}&collection={1}&dateRange={2}..{3}&areaOfInterest=x(4)y(5),x(4)y(7)&dayCoverage={8}'
19 WEB_API_PREVIEWS = 'https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/api/v1/imageFiles/'
20
21
22
23 def console_out(text):
24     # write http lib error messages to console
25     time_current = datetime.datetime.now()
26     timestamp = time_current.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
27
28     f_errors.write(timestamp + ": " + text)
29
30
31 def get_images(product, collection, date_begin, date_end, area, day_coverage):
32
33     session = requests.session()
34
35     # get images
36     image_url = WEB_API_FILES.format(product, collection, date_begin, date_end, area[0], area[1], area[2], area[3],
37                                     day_coverage)
38     img_resp = session.get(image_url).json()
39
40     # get previews
41     #ids = img_resp.keys()
42     #prev_resp = session.post(WEB_API_PREVIEWS, data={'fileIds': str(','.join(ids))}).json()
43
44     # make dict
45     result = {}
46     for key, image_info in img_resp.items():
47         result[key] = {
48             'name': image_info['name'],
49             'image_url': image_info['fileURL'],
50             'prev_url': prev_resp[key][0]['URL'] + '/' + prev_resp[key][0][
51                 'FileName'] if key in prev_resp.keys() else None
52         }
53
54     return result
55
56
57
58 images_qkm = get_images('MOD02QKM', 6, '2000-06-06', '2000-06-10', (49, 66, 60, 60), 'true')
59 QKM_dict = images_qkm

```

Рисунок 3.1 – Пример кода для выкачивания данных MODIS 1-го уровня обработки с серверов NASA (MOD02_QKM), за период с 6 по 10 июня 2000 года

- проведена геометрическая коррекция спутниковых снимков и перепроецирование при помощи специализированной программы MRT SWATH (MODIS Reprojection Tool Swath User Manual, 2010). Устранен bowtie-эффект (Xiongfei, 2008) и на выходе получено для всех файлов единое пространственное разрешение, равное 250 м, пример кода представлен на рисунке 3.2;

```

10 os.environ["PATH"] = "C:\\NextGIS\\bin;%PATH%"
11 os.environ["PROJ_LIB"] = "C:\\NextGIS\\share\\proj"
12 os.environ["SSL_CERT_FILE"] = "C:\\NextGIS\\share\\ssl\\certs\\cert.pem"
13 os.environ["CURL_CA_BUNDLE"] = "C:\\NextGIS\\share\\ssl\\certs\\cert.pem"
14 os.environ["GDAL_DATA"] = "C:\\NextGIS\\share\\gdal"
15
16
17 def create_prm():
18     prm = open('temp.prm', 'wb')
19     prm.write('INPUT_FILENAME = ' + wd + f_in + '\\n')
20     prm.write('GEOLOCATION_FILENAME = ' + wd + f_in_03 + '\\n')
21     prm.write('INPUT_SDS_NAME = ' + dataset_name + ', ' + dataset_bands + '\\n')
22     prm.write('OUTPUT_SPATIAL_SUBSET_TYPE = LAT_LONG' + '\\n')
23     prm.write('OUTPUT_SPACE_UPPER_LEFT_CORNER (LONG LAT) = ' + str(ul_x) + ' ' + str(ul_y) + '\\n')
24     prm.write('OUTPUT_SPACE_LOWER_RIGHT_CORNER (LONG LAT) = ' + str(lr_x) + ' ' + str(lr_y) + '\\n')
25     prm.write('OUTPUT_FILENAME = ' + wd + f_out + '\\n')
26     prm.write('OUTPUT_FILE_FORMAT = GEOTIFF_FMT' + '\\n')
27     prm.write('KERNEL_TYPE (CC/BI/NN) = NN' + '\\n')
28     prm.write('OUTPUT_PROJECTION_NUMBER = ALBERS' + '\\n')
29     prm.write('OUTPUT_PROJECTION_PARAMETER = 0.0 0.0 52.0 64.0 45.0 0.0 8500000.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0' + '\\n')
30     prm.write('OUTPUT_PROJECTION_SPHERE = S' + '\\n')
31     prm.write('OUTPUT_PIXEL_SIZE = ' + str(res) + '\\n')
32     prm.close()
33
34 if __name__ == '__main__':
35     #parameters start
36     swath2grid_path = 'c:/Modis/bin/'
37     os.environ['MRTSWATH_DATA_DIR'] = 'c:/Modis/data/' # тут лежит ModisReprojectionTool SWATH
38     dataset_name = 'EV_250_RefSB'
39     numbands = 2
40     dataset_bands = '1, 1'
41     # ВЫХОДНОЙ ЭКСТЕНТ, ОБРЕЗАЕТ ТИФ ПО ЭТИМ КООРДИНАТАМ
42     ul_x = 44 #45#49
43     ul_y = 70 #68#66
44     lr_x = 61 #60#60
45     lr_y = 59 #57#60
46     res = 250
47     f_out = 'result'
48     wd = sys.argv[1]
49     od = sys.argv[2]
50     product_type = sys.argv[3]
51     product_geoloc_type = sys.argv[4]

```

Рисунок 3.2 – Пример кода, позволяющего в автоматизированном режиме производить геометрическую коррекцию, перепроецирование и изменение выходного пространственного разрешения

- произведено извлечение определенных каналов из мультиспектральных снимков, с целью экономии места на жестком диске и оптимизации базы данных, пример кода представлен на рисунке 3.3.

```

os.chdir(read)
QKM = glob.glob('MOD02QKM' + '*.tif')

#print (QKM)

# Дату надо оставить в файлах на выходе
for files in QKM:
    data_type = files.split('.')[0]
    datetime = files.split('.')[1] + '.' + files.split('.')[2]
    #print (datetime)
    #print (data_type)

    # прописывается строка кода как в консоли CMD при работе с gdal.
    cmd = 'gdal_translate ' + files + ' -b 2 ' + write + data_type + '.' + datetime + '.NIR' + '.tif'

    #print (cmd)
    os.system(cmd)

```

Рисунок 3.3 – Пример кода, позволяющего получить определенный канал из мультиспектрального раstra, на примере продукта MOD02_QKM

Для ускорения процесса была использована библиотека для работы с растровыми данными GDAL (<http://www.gdal.org>) и библиотека NumPy (<http://www.numpy.org>);

- создание маски облачности с данными, соответствующим облачности и теням – по data, и данным, которые будут использованы для расчетов – равные 1, код представлен на рисунке 3.4;

```

os.chdir(read)
CLOUD = glob.glob('MOD35_L2' + '*.tif')

#print (CLOUD)

# Дату надо оставить в файлах на выходе
for files in CLOUD:
    data_type = files.split('.')[0]
    datetime = files.split('.')[1] + '.' + files.split('.')[2]
    #print (datetime)
    #print (data_type)

    # прописывается строка кода как в консоли CMD при работе с gdal.
    cmd = 'gdal_calc' + ' -A ' + files + ' --outfile=' + write + data_type + '.' + datetime + '.CLOUD_MASK' + '.tif' + ' --calc="A>0" ' + '--NoDataValue=0'

    #print (cmd)
    os.system(cmd)

```

Рисунок 3.4 – Создание маски облачности со значениями по data – облачность и тени,
1 – данные с которыми можно работать

- расчет среднего значения NDWI в 10 километровых зонах от места расположения метеостанций (буферная зона), применения маски облачности, фрагмент кода представлен на рисунке 3.5. Создание базы данных норм средних суточных значений индекса NDWI, по которым будут определяться граничные даты климатических сезонов для каждой метеостанции;

```

130
131
132
133
134     # Tell numpy not to complain about division by 0:
135     np.seterr(invalid='ignore')
136
137     #NDWI caculation
138     ndwi = (nir_b1 - swir_b2) / (nir_b1 + swir_b2)
139     #print ndwi
140
141
142     ndwi_mask = mask * ndwi
143     #print ndwi
144     #print mask
145     #print ndwi_mask #
146
147
148
149     #SAVE THE NDWI RASTER PABOTAET !!!!!
150
151     format = "GTiff"
152     driver = gdal.GetDriverByName(format)
153
154     output = driver.Create(write_NDWI + 'ndwi.' + datetime + '.' + 'cloud_mask_ZERO.tif',
155                             open_SWIR.RasterXSize, open_SWIR.RasterYSize, 1, gdal.GDT_Float32)
156
157     # Задаем проекцию эталонного файла
158     output.SetProjection(proj)
159     output.SetGeoTransform(transform)
160
161     output.GetRasterBand(1).WriteArray(ndwi) #_mask)

```

Рисунок 3.5 – Расчет среднего значения NDWI в 10 километровых зонах от метеостанций с применением маске облачности

- определение граничных дат климатических сезонов. Расчет среднего значения нормы средних суточных значений NDWI по климатическим сезонам, для всех станций;
- расчет среднего значения средних суточных значений NDWI по климатическим сезонам на каждый год;
- анализ рассчитанных данных за многолетний период наблюдений (19 лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе апробированы два принципиально разных подхода по выявлению климатических изменений. Первый подход, основан на метеорологических данных с многолетними рядами наблюдений. В основе второго – многолетние ряды спутниковых наблюдений.

Преимущество метода, основанного на спутниковых данных, состоит во временном и пространственном разрешениях, следовательно, нивелируются проблемы, связанные с плотностью и размещением гидрометеорологических станций. Кроме того, используя данные ДЗЗ, возможно провести работу по пространственно-временному анализу динамики смен граничных дат климатических сезонов (весна, лето, осень), реализуя результаты оценки посредством геоинформационного картографирования, в виде карт.

Однако, в качестве дополнительного материала, следует использовать наземные данные, так как, зачастую, они имеют более длительный период наблюдений.

На основе данных, полученных по метеорологическим показателям наземных станций, определено, что климат исследуемой территории изменяется и становится более теплым, за период вегетации.

Используя, одновременно, два метода, предложенных в данной работе, можно сделать научно-обоснованные заключения по климатическим изменениям. Чем больше входной информации для выполнения анализа, тем точнее и достовернее будут результаты.

Приведенные в настоящей работе результаты, позволяют сделать лишь предварительные выводы об изменениях климата, так как за неимением полных рядов спутниковых данных, согласно методике, расчеты не могут быть признаны полностью корректными. На данный момент база спутниковых данных обновляется, а данные обрабатываются. Исходя из этого, исследование требует продолжения, необходимы накопленные и обработанные данные за многолетний период спутниковых наблюдений, с целью получения репрезентативных и более достоверных результатов.

В качестве продолжения данной работы, предполагается внедрение искусственного интеллекта (нейронные сети), с целью создания более точной и сверх автоматизированной классификации климатических сезонов, с последующим анализом климатических изменений в автоматизированном режиме. Предполагается разработка и внедрение прогнозных методик для анализа и прогноза климатических изменений в автоматизированном режиме, а также создание модуля позволяющего в автоматизированном режиме составлять геоинформационные картографические произведения.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Результаты расчетов характеристик по климатическим сезонам (весна, лето, осень) средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) за многолетний период наблюдений и результаты расчетов средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за 18 лет 21-го века, представлены в графическом виде в данном приложении, где весна, лето, осень – средние суточные температуры (tt_{cp}), весна, лето, осень нормы – средние значения норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}).



Рисунок А.1 – Результаты расчетов средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Елецкая (23220) за 18 лет 21-го века

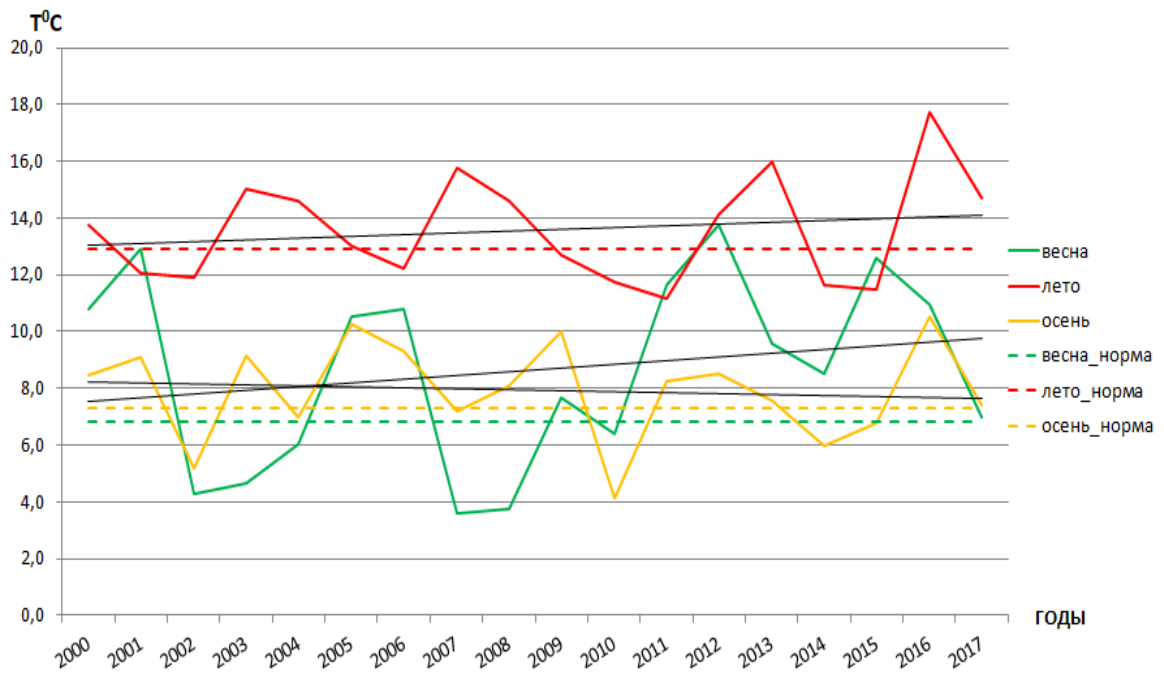


Рисунок А.2 – Результаты расчетов средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Петрунь (23324) за 18 лет 21-го века

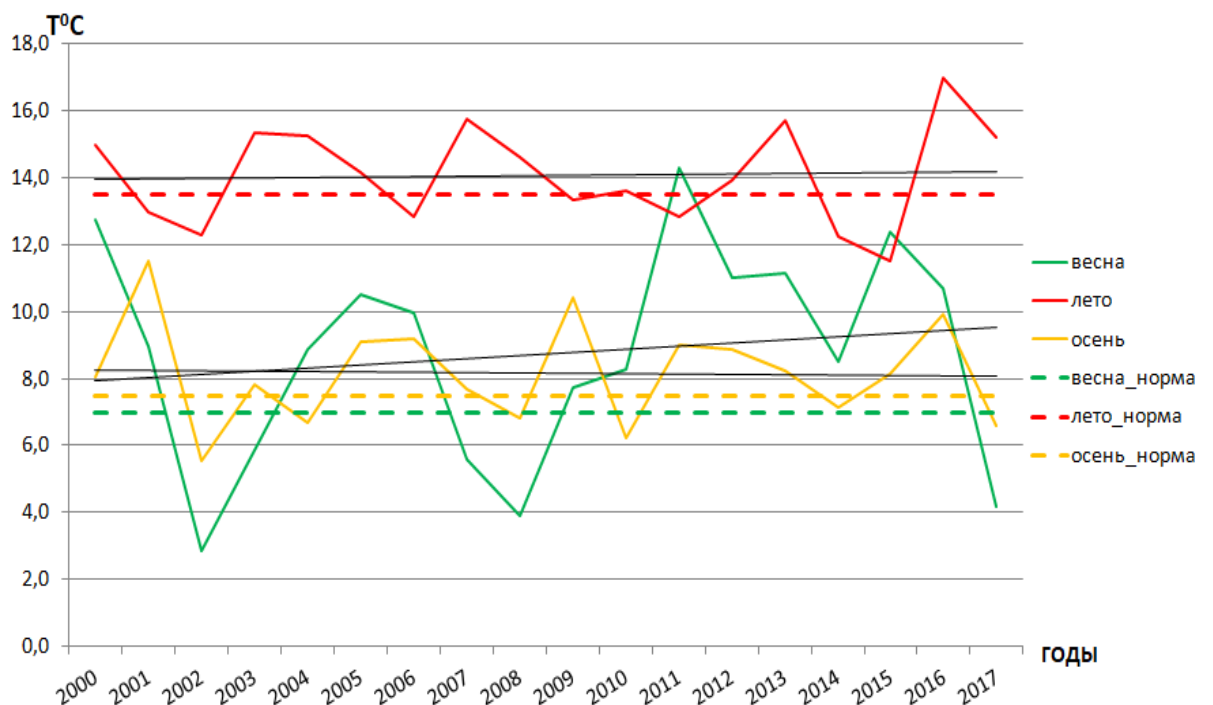


Рисунок А.3 – Результаты расчетов средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Усть-Цильма (23405) за 18 лет 21-го века

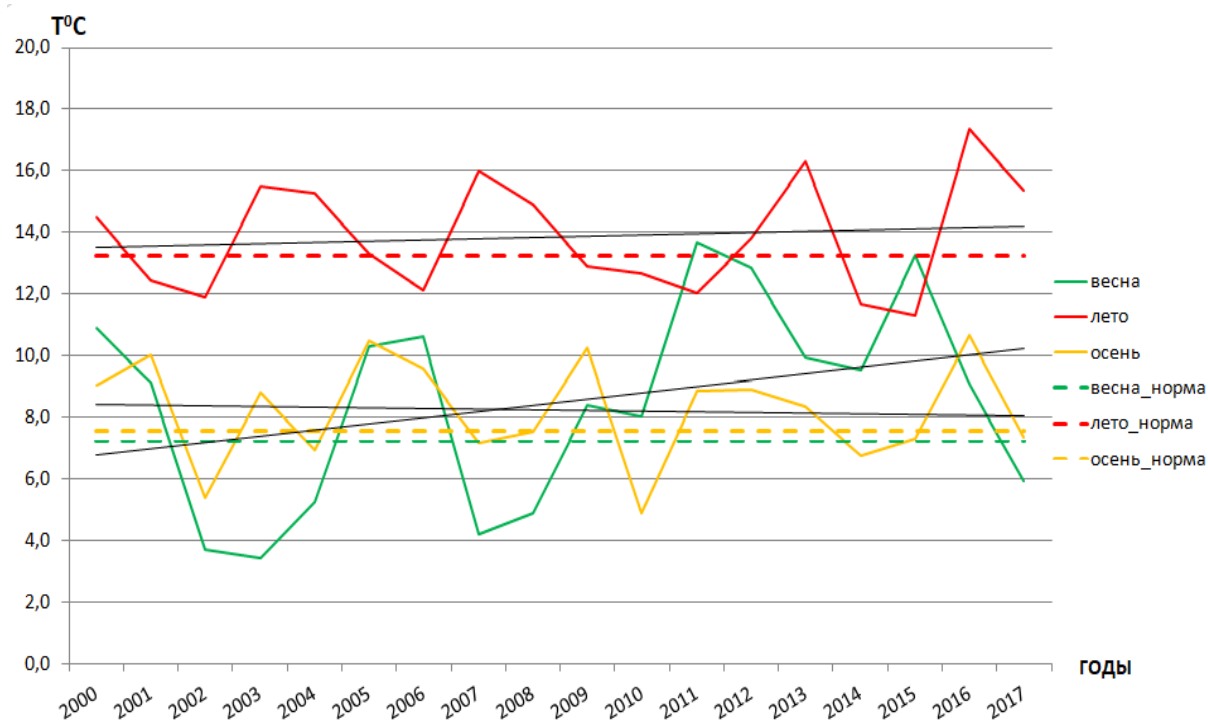


Рисунок А.4 – Результаты расчетов средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Усть-Уса (23412) за 18 лет 21-го века

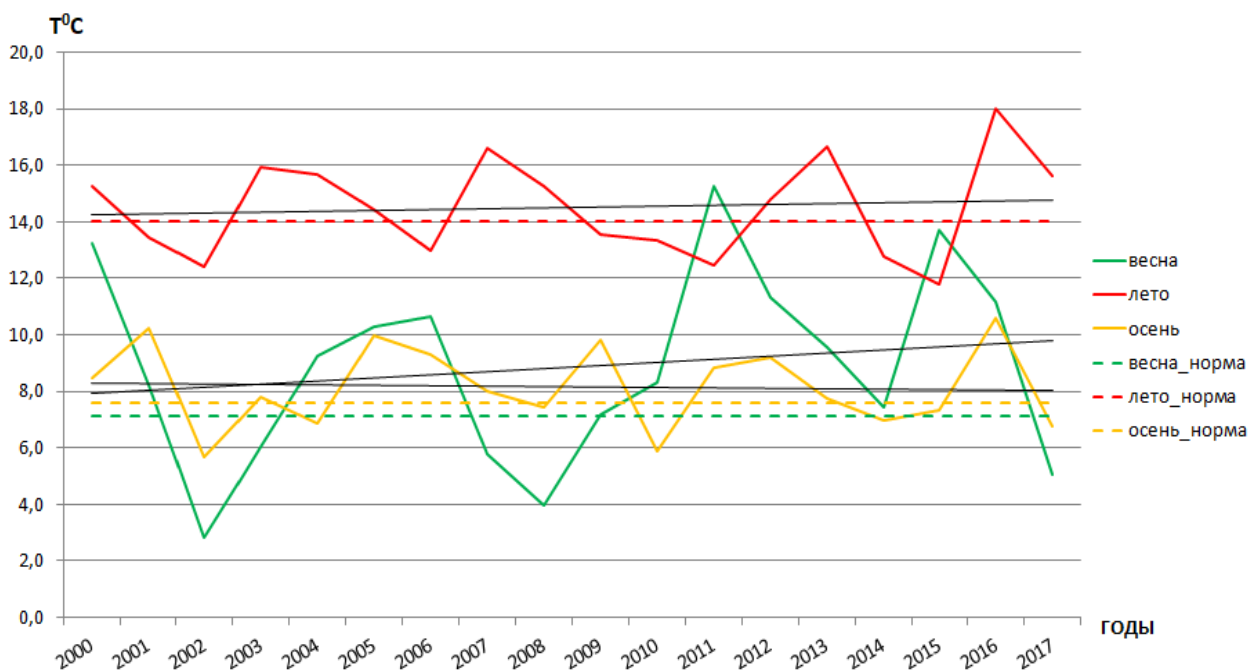
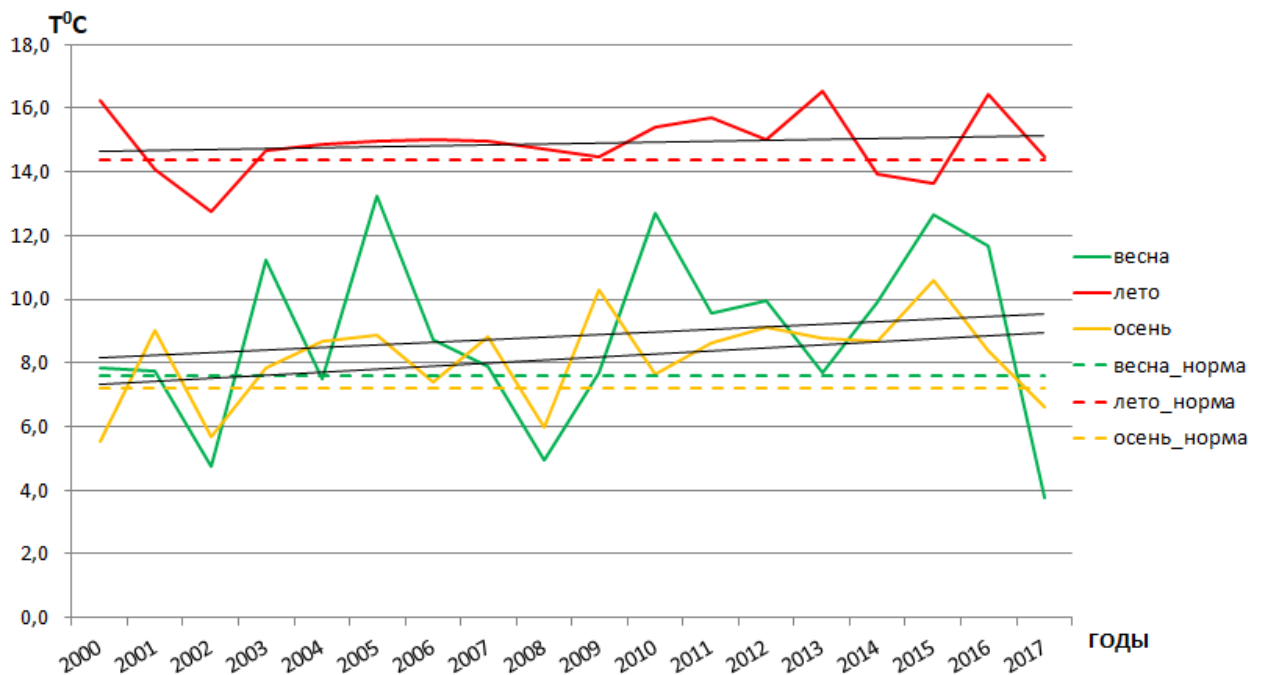
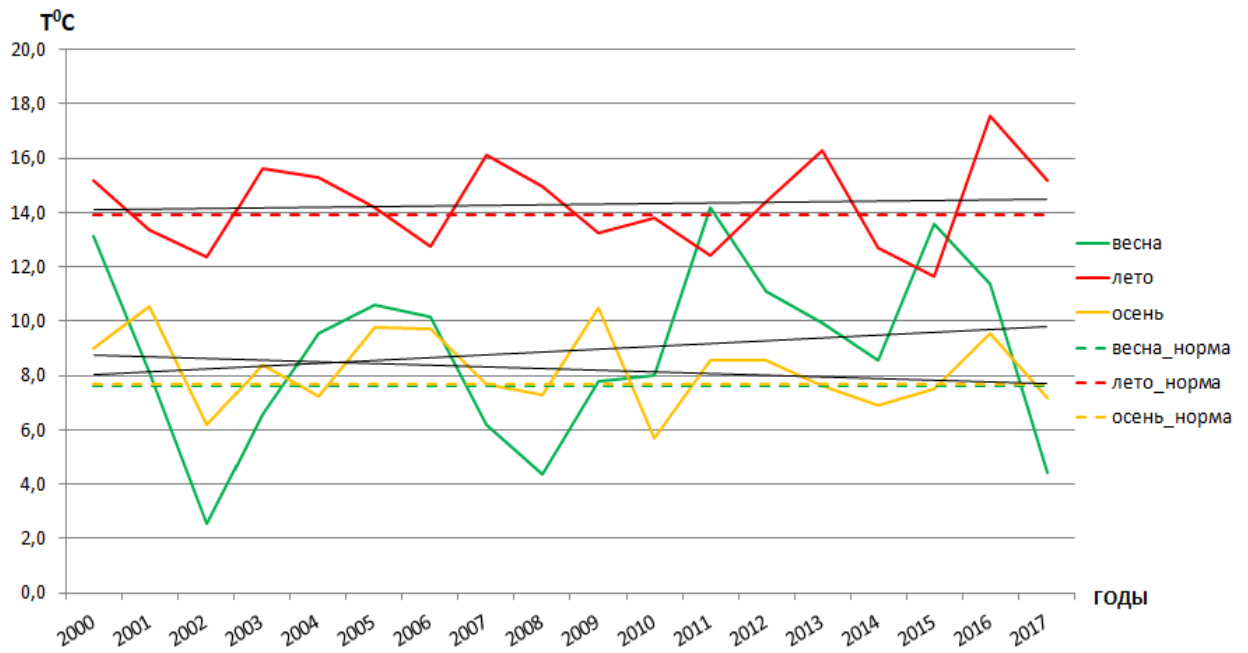


Рисунок А.5 – Результаты расчетов средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Печора (23418) за 18 лет 21-го века



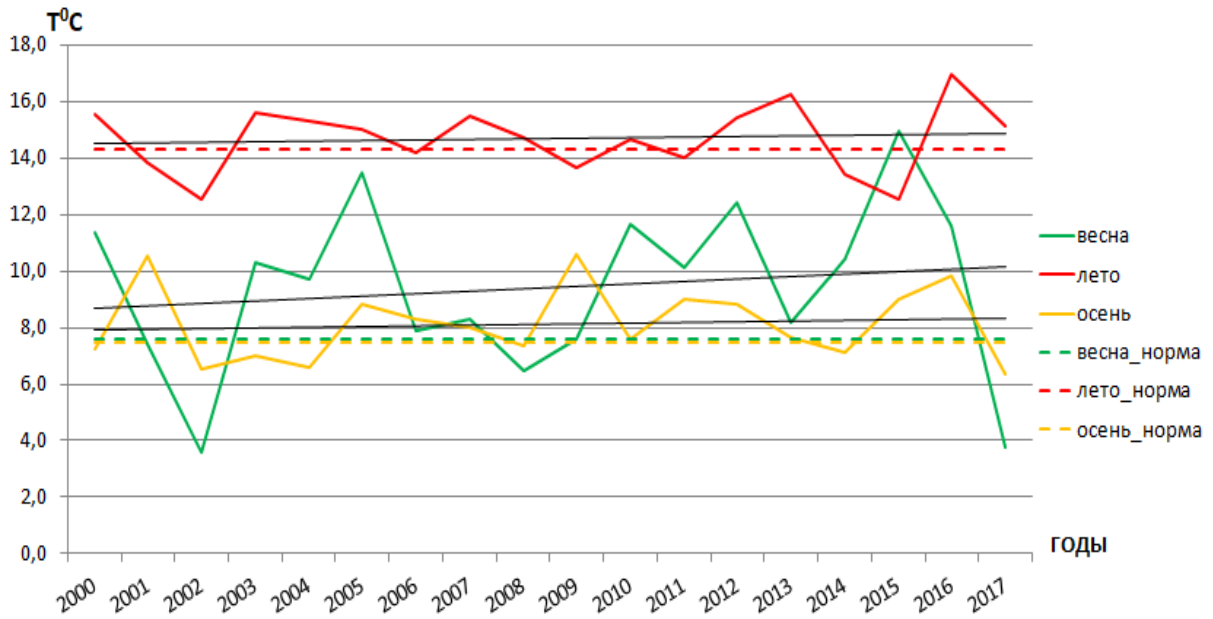


Рисунок А.8 – Результаты расчетов средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Троицко-Печорское (23711) за 18 лет 21-го века

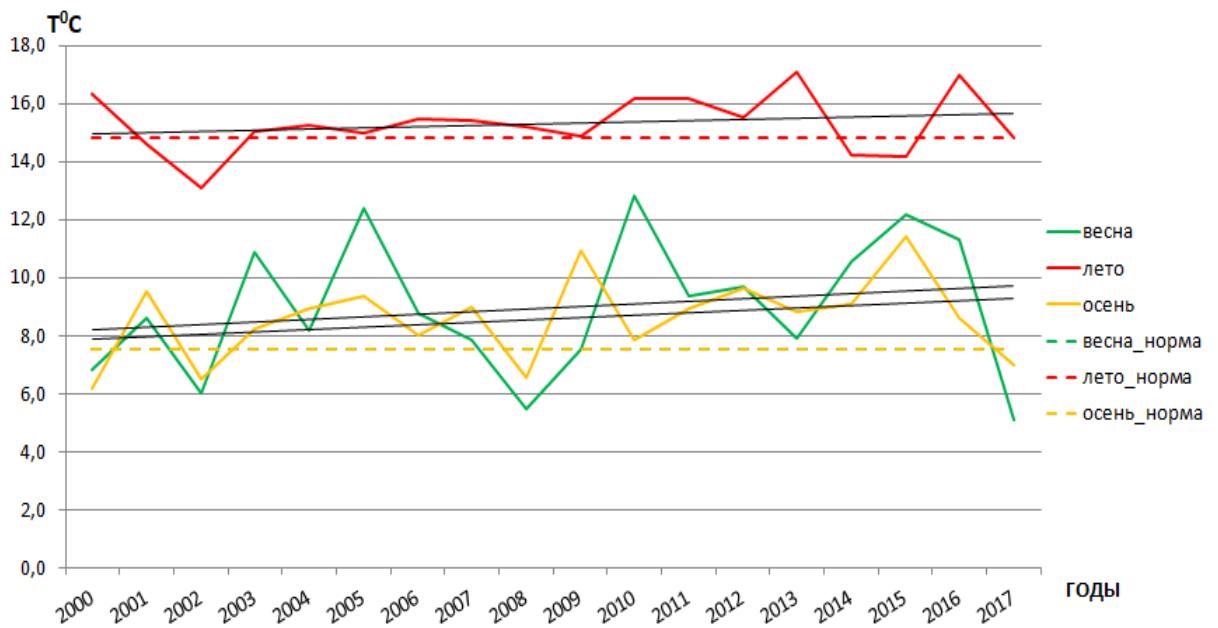


Рисунок А.9 – Результаты расчетов средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Сыктывкар (23804) за 18 лет 21-го века

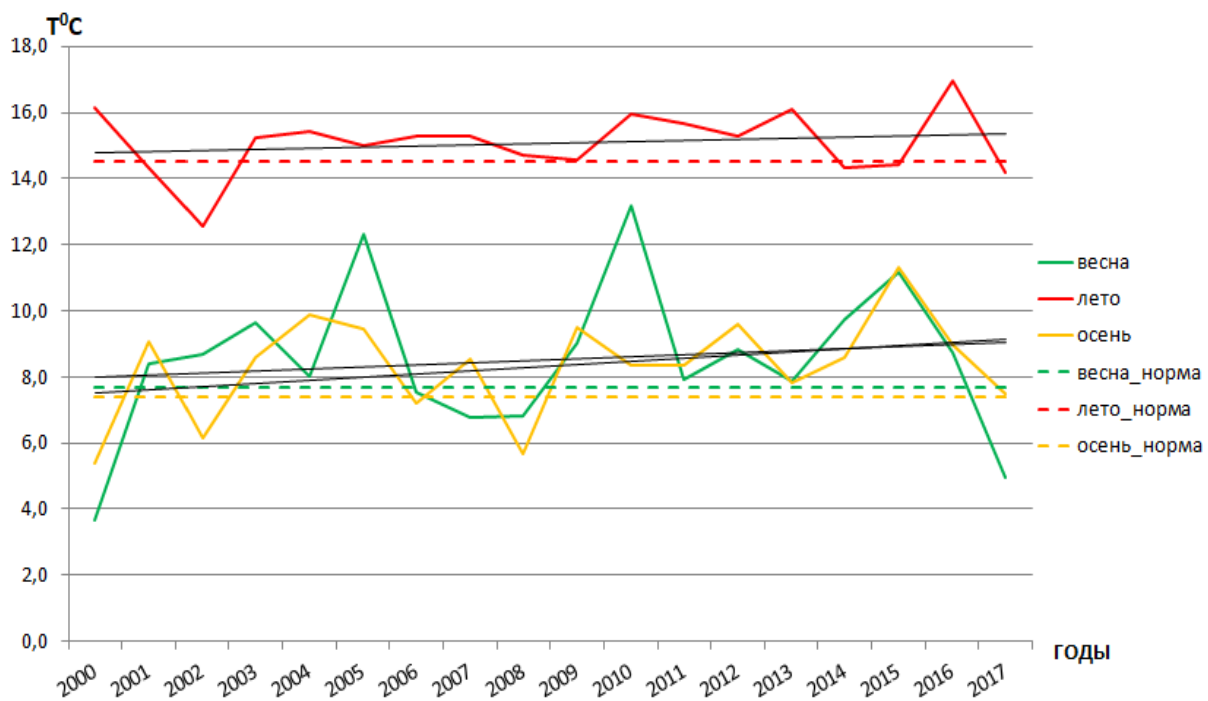


Рисунок А.10 – Результаты средних значений норм средних суточных значений температуры воздуха (tt'_{cp}) и средних значений средних суточных температур (tt_{cp}) за период климатических сезонов (весна, лето, осень) на станции Койгородок (23904)

за 18 лет 21-го века

Приложение Б

Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам, представлены в графическом виде в данном приложении, где весна, лето, осень – сумм суточных значений осадков (Σp_p), весна, лето, осень нормы – суммы норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$).

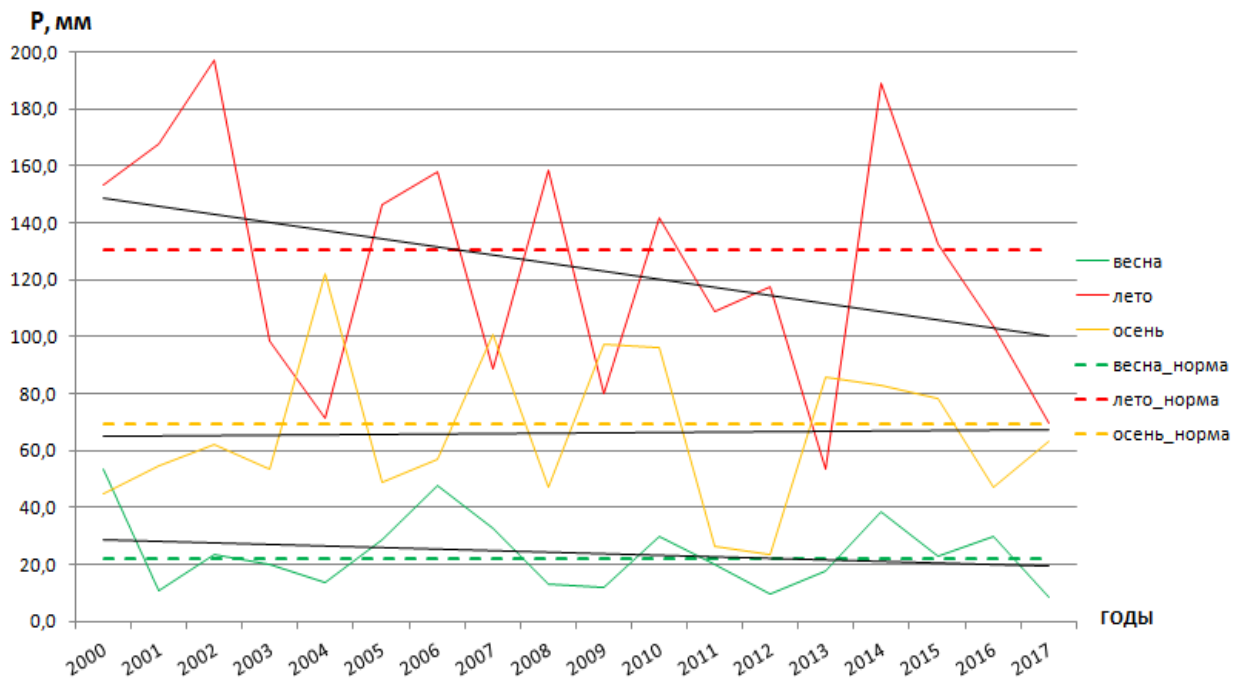


Рисунок Б.1 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Елецкая (23220)

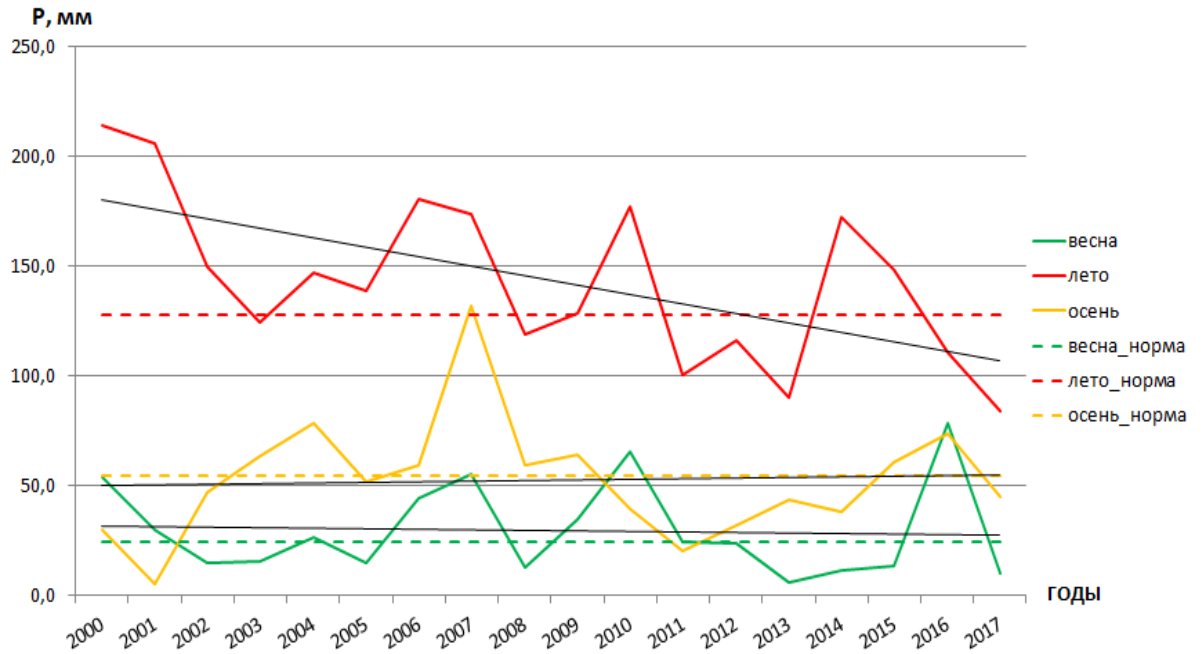


Рисунок Б.2 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Петрунь (23324)

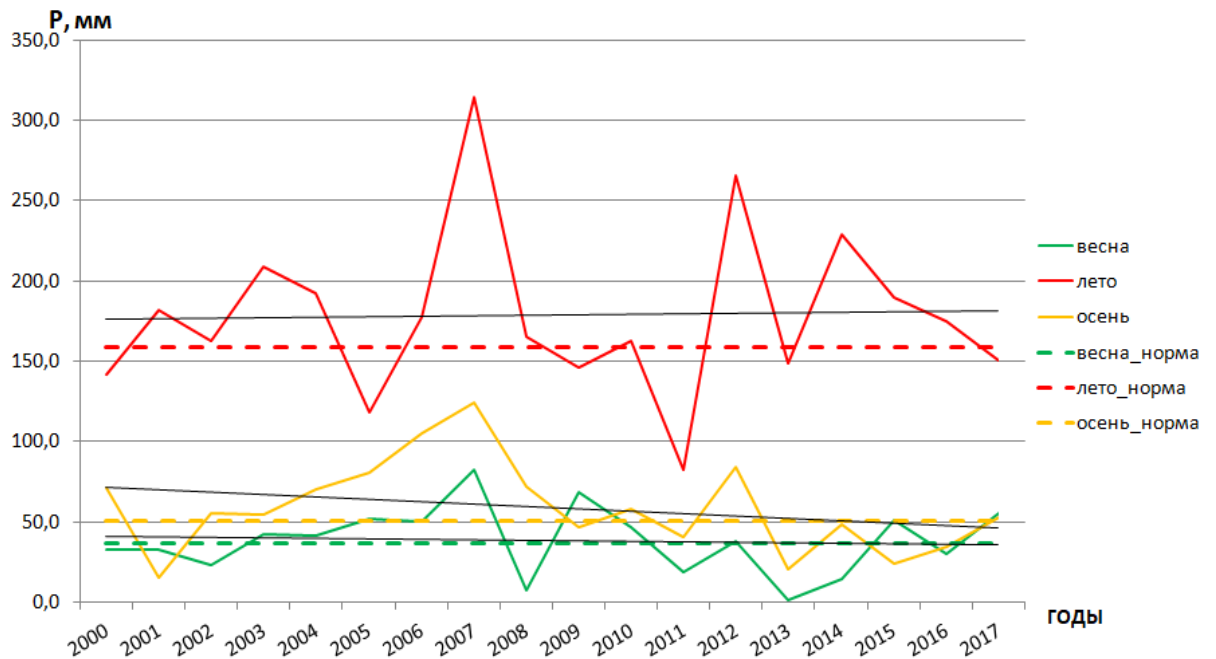


Рисунок Б.3 Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Усть-Цильма (23405)

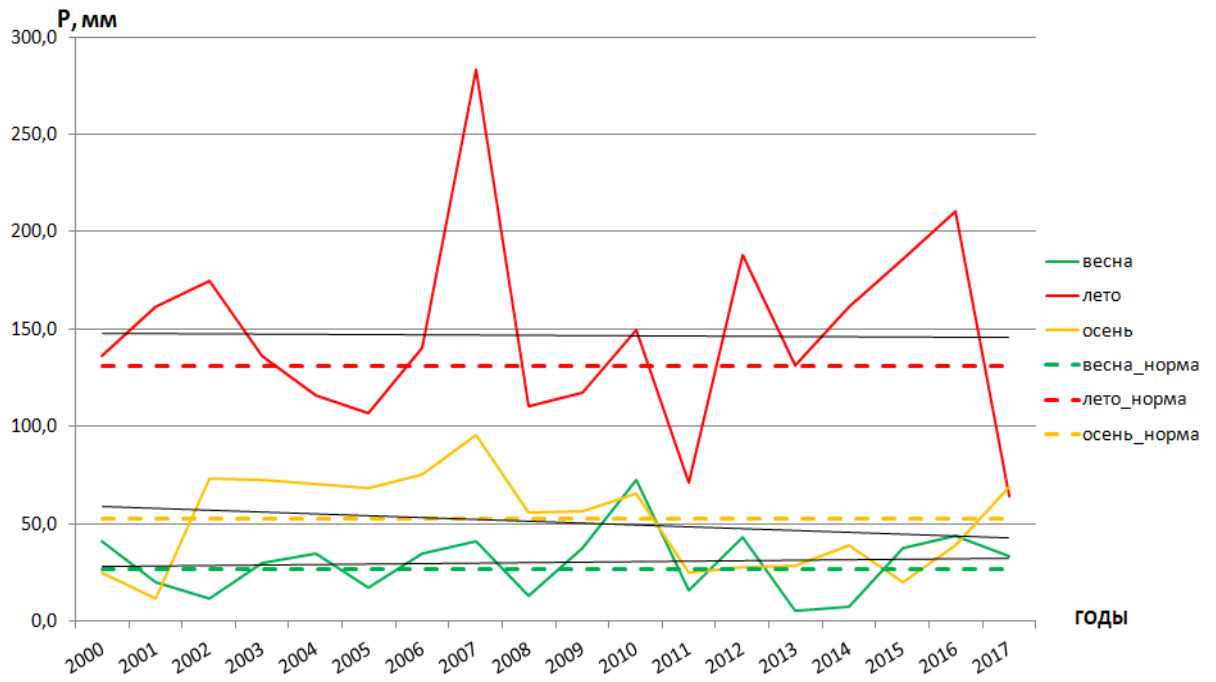


Рисунок Б.4 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Усть-Уса (23412)

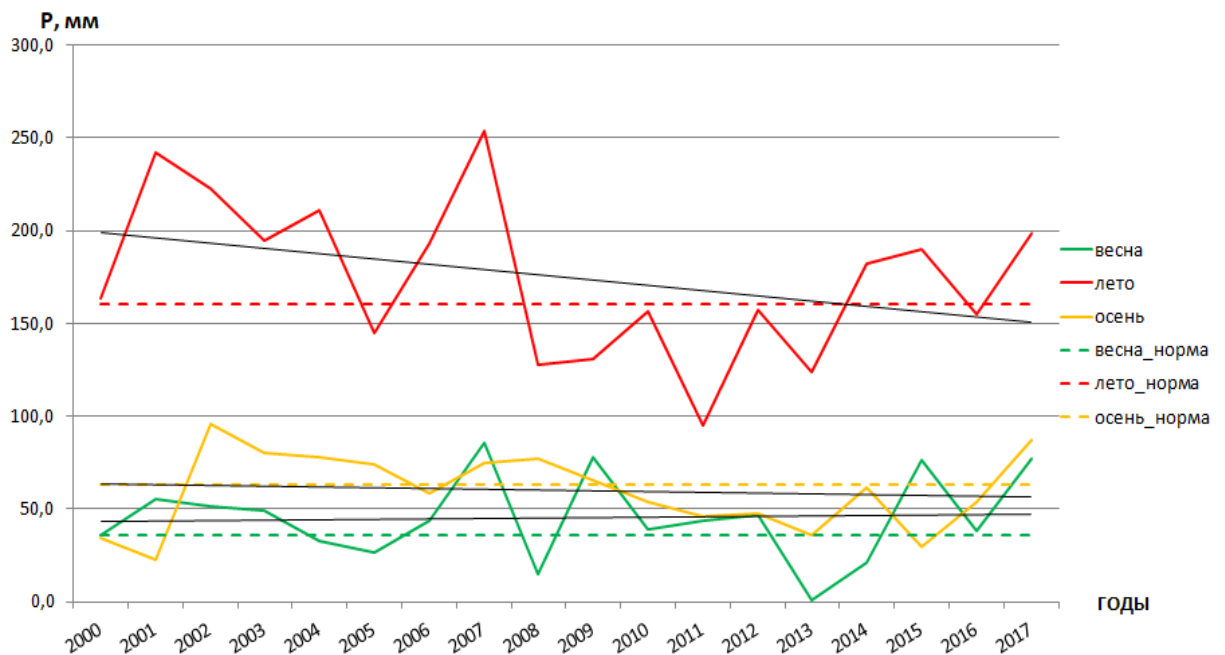


Рисунок Б.5 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Печора (23418)

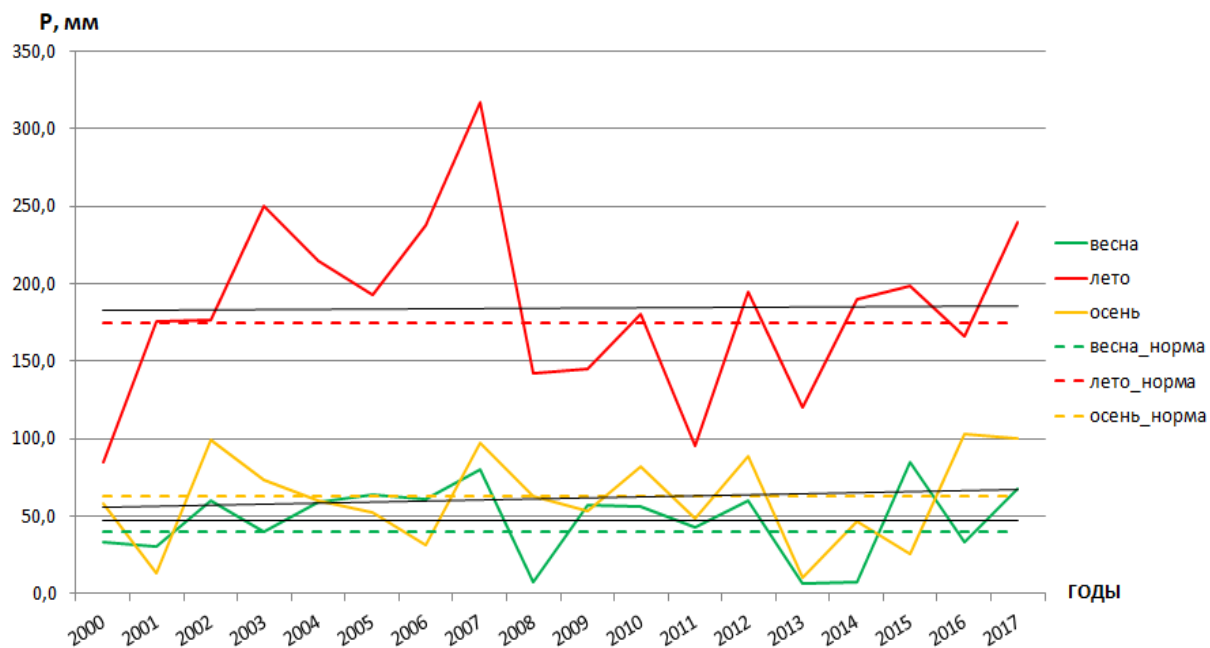


Рисунок Б.6 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Ираель (23514)

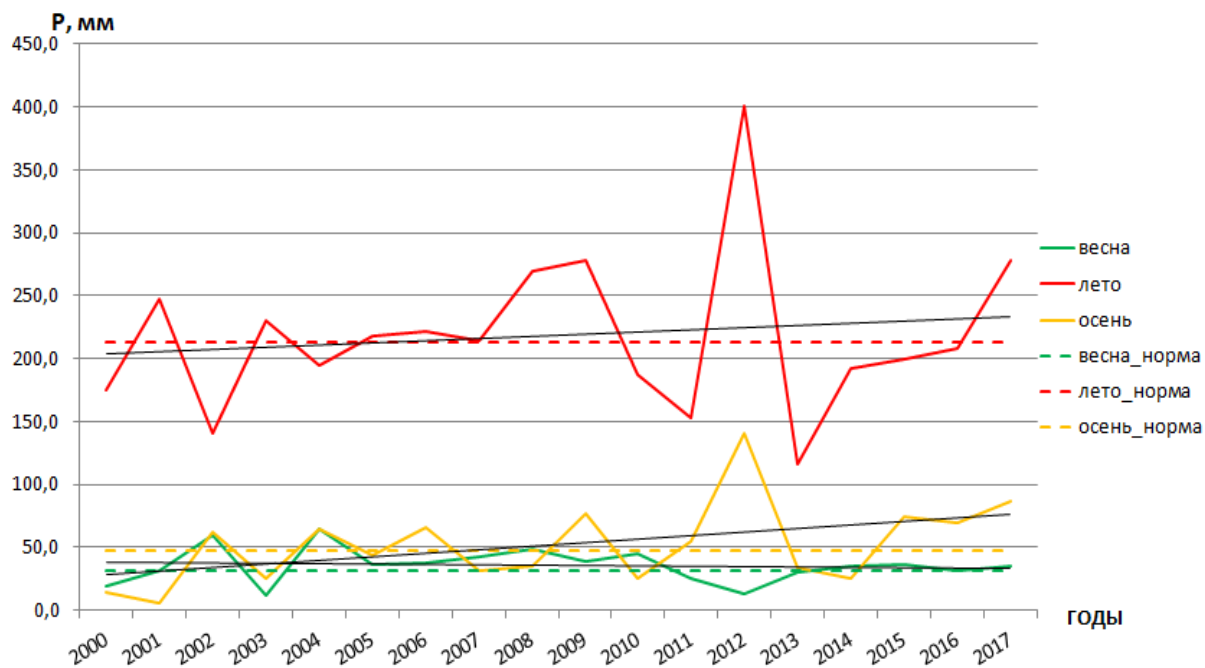


Рисунок Б.7 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Усть-Вымь (23707)

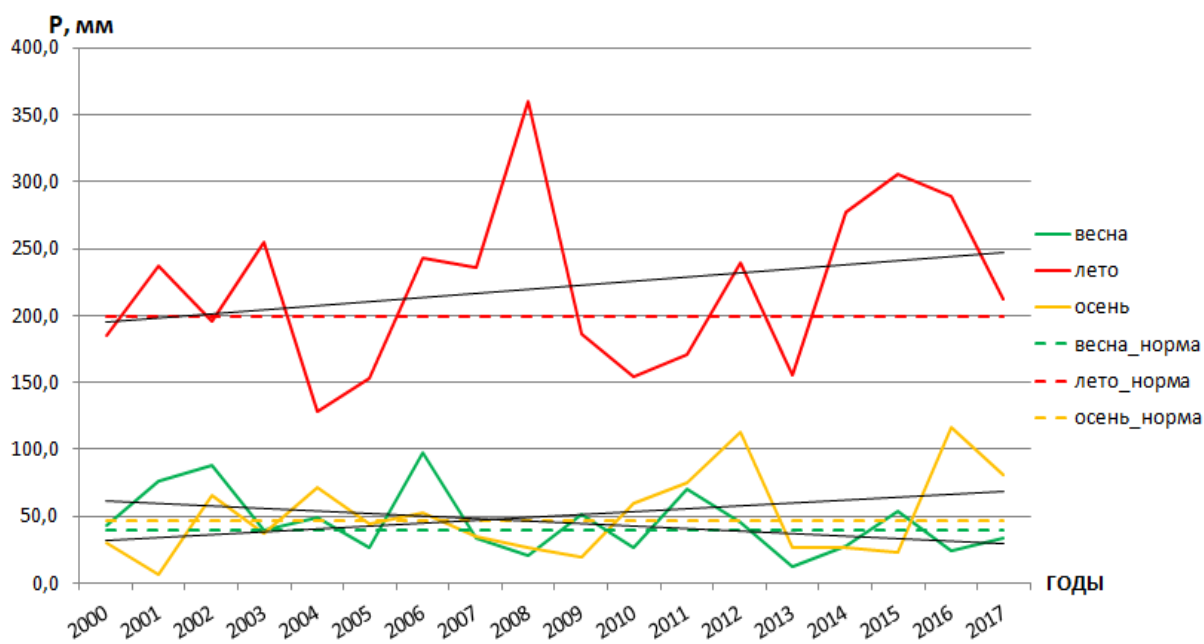


Рисунок Б.8 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Троицко-Печорское (23711)

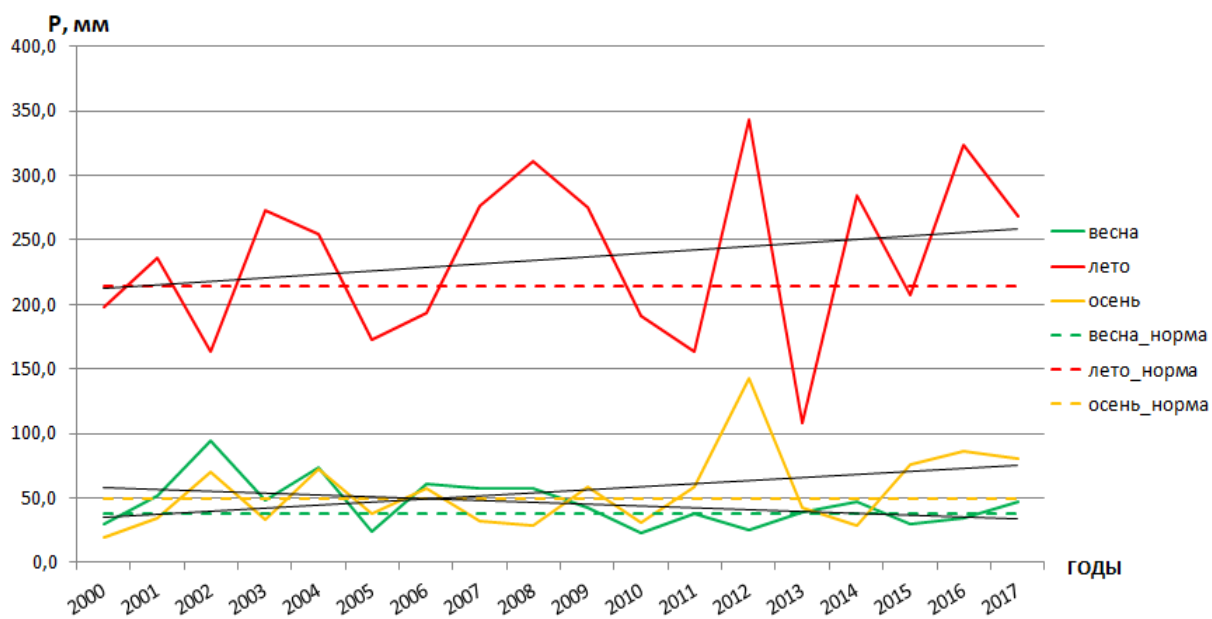


Рисунок Б.9 Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Сыктывкар (23804)

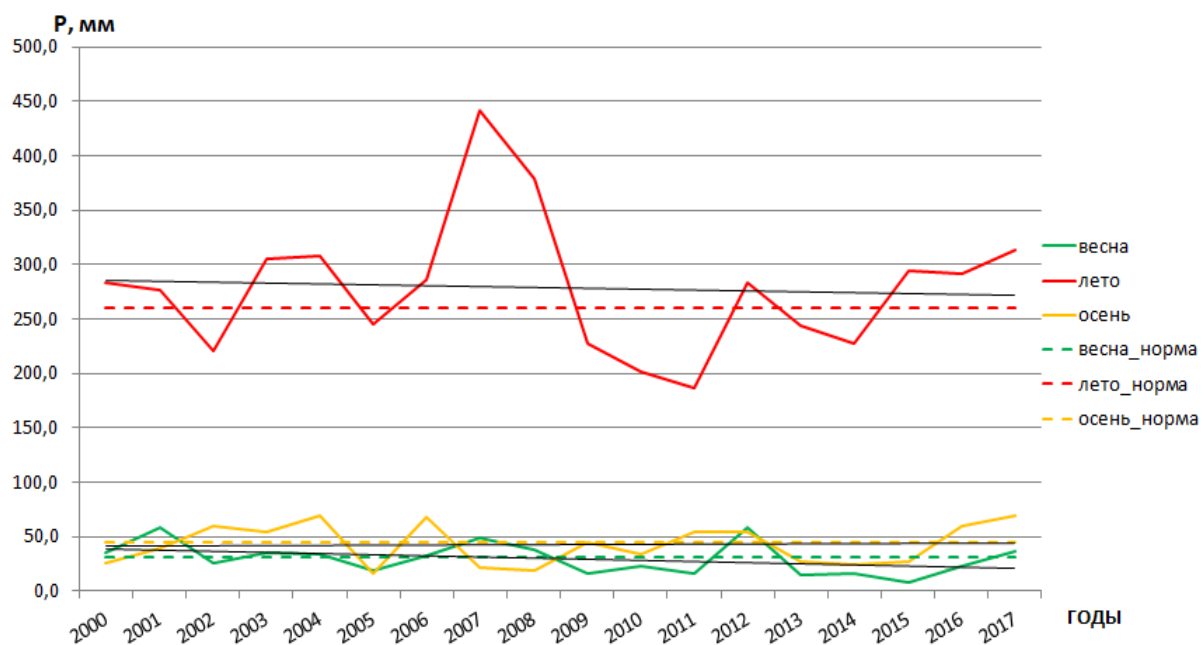


Рисунок Б.10 – Результаты расчетов сумм суточных значений осадков (Σp_p) за 18 лет 21-го века и сумм норм суточных значений осадков ($\Sigma p_p'$) по климатическим сезонам (весна, лето, осень) на станции Койгородок (23904)

Список литературы

Монографии:

1. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. Под ред. А.И. Таскаева. М.: ДиК, 1997. 115 с.
2. Барталаев С.А., Егоров В.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Гордов Е.П. Вычислительно-информационные технологии мониторинга и моделирования климатических изменений и их последствий. Новосибирск: Наука, 2013. 199 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.3. Северный Край. Под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 663 с.
5. Справочник по климату СССР, выпуск 1, часть 2, температура воздуха и почвы. Архангельская и Вологодская области, карельская и Коми АССР. Под ред. А.С. Егорова. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 360 с.

Статьи в сборниках:

6. Мирвис В.М., Гусева И.П., Мещерская А.В. Тенденция изменения временных границ теплого и вегетационных сезонов на территории бывшего СССР за длительный период // Метеорология и гидрология, 1996. № 9. С. 106–116.
7. Педь Д. А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и гидрология, 1951. №10. С. 38–39
8. Скрыник О.А., Сніжко С.І. Задача визначення дати стійкого переходу приземної температури повітря через певне фіксоване значення (аналіз методів) // Український гідрометеорологічний журнал, 2008. С. 56–66.
9. Скрыник О.Я., Скрыник А.А. Климатологический метод определения даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданное пороговое значение // Метеорология и гидрология, 2009. С. 90–99.
10. Ahmad S. P., Salomonson V. V. Modis radiances and reflectances for earth system science studies and environmental applications. // 18th International Conference on IIPS, USA, 2002.
11. Ahmad S. P., Salomonson V. V., Barnes W. L., Xiong X., Leptoukh G. G., and Serafino G. N. MODIS radiances and reflectances for earth system science studies and environmental applications // NASA Goddard Space Flight Center.

12. Bontemps, S. et al. Revisiting land cover observations to address the needs of the climate modelling community. *Biogeosci. Discuss.* 8. 2011. Pp. 7713–7740.
13. Gao B.C. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 58 (3). 1996. Pp. 257–266.
14. Ghent, D., Kaduk, J., Remedios, J. & Balzter, H. Data assimilation into land surface models: The implications for climate feedbacks. *Int. J. Remote Sens.* 32, 2011. pp. 617–632.
15. Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*, 2007. Vol. 2, No. 4. 045031. 9 p. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045031.
16. Gong, P. et al. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *Int. J. Remote Sens.* 34, 2013. Pp. 2607–2654.
17. Hanqiu X. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. // *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 27. No. 14, 20 July 2006. Pp. 3025–3033.
18. Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Spatial heterogeneity of tundra vegetation response to recent temperature changes // *Global Change Biology*, 2006. № 12. Pp. 42–55.
19. Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009. No. 11. Pp. 2231–2238.
20. Joyce, K. E., Belliss, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J. & Glassey, P. J. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Prog. Phys. Geog.* 33 (2), 2009. Pp. 183–207.
21. Jun Y., Peng G.. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change*. Vol. 3. 2013. Pp. 875–883.
22. Krankina O.N., Pflugmacher D., Hayes D.J., McGuire A.D., Hansen M.C., Elsakov V., Nelson P. Vegetation Cover in the Eurasian Arctic: distribution, monitoring, and role in carbon cycling. Chapter 5. *Eurasian arctic land cover and land use in a changing climate*. Springer, 1st edition, 2010. 7908 p.
23. Lingkui M., Jiyuan L. A System for Automatic Processing of MODIS L1B Data // *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, China, 2008. Pp. 335–343.
24. Panidi E., Tsepelev V. NDWI-based technique for detection of change dates of the growing seasons in Russian Subarctic // *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W2, 2017. Pp. 179–182.

25. Panidi E., Tsepelev V., Torlopova N., Bobkov A. Mapping of the land cover spatiotemporal characteristics in Northern Russia caused by climate change // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLI-B8, 2016. Pp. 997–1002.
26. Sekhon N.S., Hassan Q.K., Sleep R.W. A Remote Sensing Based System to Predict Early Spring Phenology Over Boreal Forest. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVIII. Part 1. 2010. № 5. P.14.
27. Sladek I. Urcovani nastupu a ukonceni svorenych teplot vzduchu metodou souctovych radodchylek // Meteorologichne zpravy, 1989. Vol. 42.
28. Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmrich F., Houston S., Racine C., Sturm M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawai K., Tweedie C., Noylek B., Silapaswan C., Douglass D., Griffith B., Jiao G., Epstein H., Walker D., Daeschner S., Petersen A., Zhou L., Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. Remote Sensing of Environment, 2004. No. 89. Pp. 281–308.
29. Walker M.D., Wahren C.H., Hollister R.D., Henry G.H.R., Ahlquist L.E., Alatalo J.M., Bret-Harte M.S., Calef M.P., Callaghan T.V., Carroll A.B. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006. № 103(5). pp. 1342–1346.
30. Wookey P.A., Aerts R., Bardgett R.D., Baptist F., Brathen K.A., Cornelissen J.H.C., Gough L., Hartley I.P., Hopkins D.W., Lavorel S., Shaver G.R. Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change. // Global Change Biology, 2009. Vol. 15. pp. 1153–1172.
31. Xiongfei W. A new prompt algorithm for removing the bowtie effect of MODIS L1B data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B3b. Beijing, 2008. Pp. 5–10.

Руководства:

32. Руководящий документ. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 10. Инспекция гидрометеорологических станций и постов. Часть I. Инспекция метеорологических наблюдений на станциях. РД 52.04.666-2005, по состоянию на 2011 год.
33. MODIS Level 1B Product User's Guide, Members of the MODIS Characterization Support Team, USA: 2006. 62 p.
34. MODIS Level 1B In-Granule Calibration Code (MOD_PR02) High-Level Design. Members of the MODIS Characterization Support Team, USA: 2012. 46 p.

35. MODIS Reprojection Tool Swath User Manual, Release 2.2. 2010. Pp. 638.

Книги:

36. Козельцева В.Ф., Педь Д.А. Данные о весенних датах перехода температуры воздуха через 0, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ по станциям западной части территории СССР. Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 1987. 58 с.

Неопубликованные статьи:

37. Паниди Е.А., Рыкин И.С., Цепелев В.Ю. О проблеме определения временных границ вегетационных сезонов по данным наземных наблюдений и дистанционного зондирования. (Принята к публикации).

38. Рыкин И. Автоматизированный комплекс по выявлению региональных климатических изменений на основе данных ДЗЗ. (Принята к публикации).

39. Рыкин И., Паниди Е.А. Разработка автоматизированного комплекса по выявлению региональных климатических изменений на основе материалов спутниковой съемки. . (Принята к публикации).

40. Panidi E., Rykin I., Nico D., Tsepelev V. Toward Satellite-based Estimation of Growing Season Framing Dates in Conditions of Unstable Weather. (Принята к публикации).

Ресурсы сети Интернет:

41. <http://www.aisori-m.meteo.ru/waisori/index.html> – Специализированные массивы метеорологических данных для климатических исследований, 10 марта 2018

42. <http://www.gdal.org>

43. <http://www.gis-lab.info/qa/laadsweb.html> – LAADS Web – система получения данных MODIS первого уровня обработки, 10 марта 2018

44. <http://www.numpy.org>

45. <http://www.rkomi.ru/left/info/polozh> – Общие данные о Республике Коми, 10 марта 2018

46. <https://www.ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search> – LAADS DAAC MODIS DATA STORAGE, 10 марта 2018

47. <https://www.mcst.gsfc.nasa.gov/l1b/l1b-data-inputs-outputs> – L1B Data Inputs/Outputs, 10 марта 2018.

48. <https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD02QKM.html>

49. <https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD02HKM.html>
50. <https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD03.html>
51. https://www.modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD35_L2.html
52. https://www.modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/dataproducts.php?MOD_NUMBER=02
– Modis Data Product 02, 10 марта 2018